

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv parametrů obrábění na povrch termálního nástřiku  
při přerušovaném řezu

Influence of Machining Parameters on the Surface of  
the Thermal Spraying During Interrupted Cut

Student: Bc. David Brotánek

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2019

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Brotánek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Vliv parametrů obrábění na povrch termálního nástřiku při  
přerušovaném řezu**  
**Influence of Machining Parameters on the Surface of the Thermal  
Spraying During Interrupted Cut**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Charakteristika dané problematiky.
3. Návrh experimentálního obrábění a měření.
4. Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení.
5. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.  
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.  
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.  
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....20.5.2019

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 + užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB –TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavře licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2019



podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: David Brotánek

Adresa trvalého pobytu autora: Hulín, Družba 1195

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Brotánek, D. *Vliv parametrů obrábění na povrch termálního nástřiku při přerušovaném řezu*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 87s. Vedoucí práce Ing. Tomáš Zlámal Ph.D.

Diplomová práce pojednává o vlivu parametrů obrábění termálního nástřiku při přerušovaném řezu. První část je zaměřena na možnosti a druhy výroby termálních nástřiků, jejich charakteristiku, využití a také na jejich následné zpracování. Další část je věnována měření řezných sil, měření tvrdosti a měření drsnosti. V praktické části jsou popsány jednotlivé stroje a měřicí přístroje, které byly v experimentální části využity. Dále jsou popsány materiály obráběných nástřiků a návrh parametrů a řezných nástrojů k jejich obrobení a popis měření výsledných řezných sil při procesu obrábění. K závěru jsou vyhodnoceny naměřené výsledky a vizuální porovnání obrobených ploch a hran při simulaci přerušovaného řezu.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

Brotánek, D. *Influence of Machining Parameters on the Surface of the Thermal Spraying During Interrupted Cut*: master thesis. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 87p. Bachelor thesis, head: Ing. Tomáš Zlámal Ph.D.

The master thesis deals with the influence of the thermal spraying parameters in the interrupted cut. The first part focuses on the possibilities and types of thermal spraying Production, their characteristics, their use and their subsequent processing. The next part is focused on cutting force measurement, hardness measurement and roughness measurement. In the practical part are described individual machines and measuring instrument used in the experiment part. It also describes the materials of machined sprays and the design of parameters and cutting tools for their machining and a description of the measurement of the resulting cutting forces in the machining process. Finally, the measured results and the visual comparison of the machined surfaces and edges in the simulation cut are evaluated.

## Obsah

	Seznam použitých značek a symbolů .....	7
	Úvod.....	9
1	Žárové nástřiky a jejich obrábění .....	10
1.1	Úvod do žárových nástřiků.....	10
1.2	Typy nástřiků.....	13
1.2.1	Tepelné bariéry (TBC – Thermal Barrier Coating) .....	13
1.2.2	Povlaky odolné proti opotřebení .....	13
1.2.3	Obrusitelné těsnící povlaky (Abradable).....	14
1.3	Rozdělení a druhy žárových nástřiků .....	17
1.3.1	Žárový nástřik plamenem .....	17
1.3.2	Vysokorychlostní nástřik VHOF .....	18
1.3.3	Detonační nástřik.....	19
1.3.4	ARC Spray.....	20
1.3.5	Plazma .....	22
2	Teorie potřebná k obrábění.....	24
2.1	Fyzikální rozbor procesu řezání .....	25
2.2	Přerušovaný proces řezání .....	29
3	Metodika měření.....	33
3.1	Měření tvrdosti .....	33
3.1.1	Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	34
3.1.2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella .....	35
3.1.3	Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	36
3.2	Měření řezných sil podle dynamometrů .....	37
3.2.1	Mechanické dynamometry .....	37
3.2.2	Hydraulické a pneumatické dynamometry .....	38
3.2.3	Dynamometry elektrické .....	38
3.3	Měření povrchu obrobené plochy.....	40
3.3.1	Dotyková metoda měření drsnosti.....	42
3.3.2	Bezdotyková metoda měření drsnosti .....	43
4	Experimentální část .....	44
4.1	Návrh experimentu .....	44
4.2	Použitá zařízení, příprava vzorků a jejich obrobení .....	45
4.3	Souhrn naměřených hodnot.....	51
4.4	Grafické znázornění výsledků .....	77
	Závěr.....	81
	Použitá literatura.....	83

**Seznam použitých značek a symbolů**

C	Kapacita	[F]
C <sub>F</sub>	Konstanta pro vliv materiálu	[mm <sup>2</sup> ]
ČSN	česká státní norma	[-]
EN	evropská norma	[-]
d <sub>1</sub> ,d <sub>2</sub>	Úhlopříčky	[mm]
D	průměr vtlačovaného tělíska	[mm]
E <sub>d</sub>	elastický modul diamantu	[-]
E <sub>p</sub>	elastický modul zkoušeného materiálu	[-]
F	Síla	[N]
F <sub>0</sub>	předběžné zatížení	[N]
F <sub>1</sub>	přídavné zatížení	[N]
F <sub>c</sub>	Řezná složka síly	[N]
F <sub>f</sub>	Posuvová složka síly	[N]
F <sub>p</sub>	Pasivní složka síly	[N]
F <sub>x</sub>	Složka řezné síly v ose x	[N]
F <sub>y</sub>	Složka řezné síly v ose y	[N]
F <sub>z</sub>	Složka řezné síly v ose z	[N]
Hf	Hafnium	[-]
HB	tvrdost dle Brinella	[-]
HBS	tvrdost dle Brinella (kulička z kalené oceli)	[-]
HBW	tvrdost dle Brinella (kulička z SK)	[-]
HRC	tvrdost dle Rockwella	[-]
HSC	High speed cutting	[-]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]

HVOF	Vysokorychlostní nanášení	[-]
L	Indukčnost	[H]
R	Odpor	[Ω]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rk	Základní hloubka	[μm]
Rpk	Redukovaná výška špiček	[μm]
Rt	Celková výška profilu	[μm]
Rvk	Redukovaná výška rýh	[μm]
Rz	Největší výška profilu	[μm]
S	Průřez	[mm <sup>2</sup> ]
TBC	Thermal barrier coating	[-]
U	Rozšířená nejistota	[~]
a <sub>p</sub>	Hloubka řezu	[mm]
c <sub>F</sub>	Materiálová konstanta	[-]
f	Posuv	[mm]
k <sub>U</sub>	Koeficient rozšíření	[-]
n	Počet měření	[-]
p	Měrný řezný odpor	[MPa]
s(x)	Výběrová směrodatná odchylka	[~]
u <sub>A</sub>	Standartní nejistota typu A	[~]
v <sub>c</sub>	Řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]
x <sub>F</sub>	Exponent šířky záběru a <sub>p</sub>	[-]
y <sub>F</sub>	Exponent posuvu f	[-]
β <sub>0</sub>	Úhel břitu v ortogonální rovině	[°]
δ	Nástrojový úhel	[°]
$\bar{x}$	Výběrový průměr naměřených hodnot	[~]
λ <sub>s</sub>	Nástrojový úhel sklonu ostří	[°]



## Úvod

Zadání diplomové práce bylo navrženo v součinnosti s pracovníky společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., která sídlí v Hlubočkách – Mariánské Údolí v Olomouckém kraji a působí ve strojírenství jako výrobce a dodavatel statických součástí leteckých motorů. Mimo výrobu nových součástí se také zabývá renovací a generálními opravami.

Diplomová práce se zabývá obráběním povrchů, jenž jsou zhotoveny technologií žárového nanášení materiálů se zaměřením na přerušované řezání. V teoretické části jsou rozebrány aplikace technologie žárového nanášení materiálu v leteckém průmyslu a jejich rozdělení podle jednotlivých zdrojů tepelné energie při nanášení. Dále podrobnější rozdělení metod nanášení používaných v praxi. V další teoretické části se diplomová práce věnuje problematice obrábění se zaměřením na proces řezání a k němu náležité silové vztahy, přerušovanému řezání a fyzikální problematice tohoto tématu.

Konec teoretické části je věnován metodám výroby a měření, které byly nutné pro realizaci praktické části diplomové práce. Konkrétně se jedná o měření sil při procesu řezání, měření tvrdosti a drsnosti povrchu.

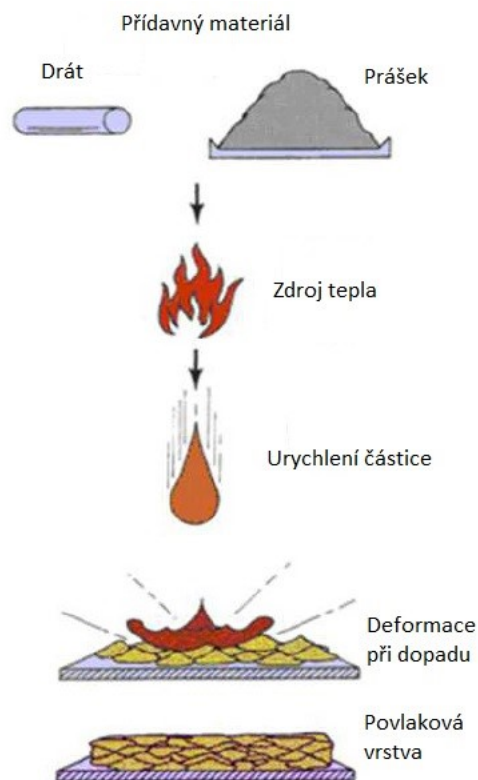
Předmětem praktické části je zjištění hodnot výsledných řezných sil při soustružení vzorků v podobě mezikružích, na které jsou nanесeny dva typy žárových nástřiků pomocí technologie ARC spray. Prvním typem je materiál Praxair Tafa 01S na bázi hliníku a druhým je Praxair Tafa 75B na bázi niklu. Na mezikružích jsou vytvořeny drážky, díky kterým je při jejich soustružení simulován přerušovaný řez. Dále na površích, které jsou soustruženy za pomoci odlišných řezných podmínek je zjišťována a porovnávána výsledná drsnost a výsledné zpevnění povrchové vrstvy oproti hodnotám před obrobením, přičemž výsledky jsou statisticky zpracovány.

# **1 Žárové nástřiky a jejich obrábění**

## **1.1 Úvod do žárových nástřiků**

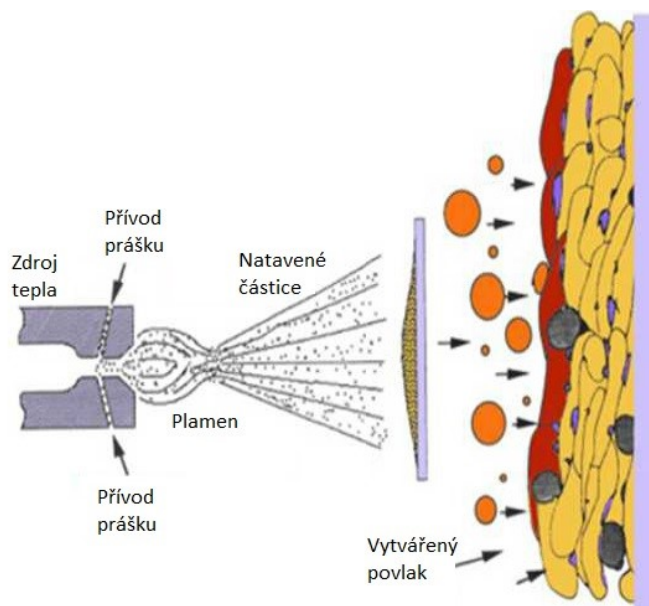
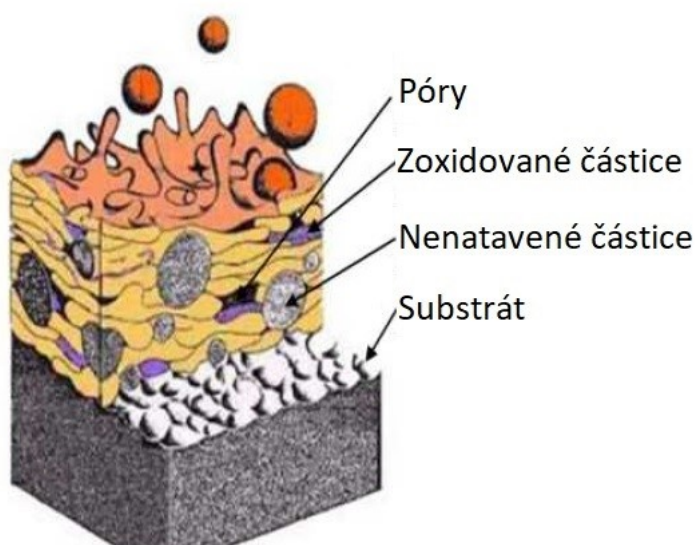
Technologie žárových nástřiků sahá až do roku 1910, kdy ji vynalezl a patentoval Max Ulrich Schoop ve Švýcarsku. Z počátku se kvůli nedostatečným zdrojům tepla (pouze kyslík-acetylenový plamen) tato metoda používala k aplikacím jako nanášení zinku. Schoop byl také vynálezcem metody obloukového nanášení, která ovšem byla v jejich začátcích také nedokonalá především z důvodu nízkého vývojového stupně elektrických zařízení jako například zdroj stejnosměrného proudu. Následující významný pokrok probíhal ve třicátých letech v USA, kdy se aplikace rozšířily k využití nanášení ochranných vrstev zinku, hliníku a na renovaci strojních součástí stříkáním ocelí a bronzů.<sup>1</sup>

Další významný rozmach se datuje k období po druhé světové válce a to především v obloukovém stříkání. Plamenovou a obloukovou metalizaci od počátku omezovala nízká teplota plamene nebo elektrického oblouku. Materiály s teplotou tavení například 2600 °C nebylo možné nanášet. Výsledkem snahy zvyšování teplot tepelného zdroje byl vývoj tzv. plazmového stříkání. Tato metoda přinesla výhody nejen v dosažení podstatně vyšších teplot tavení nanášeného materiálu, ale také výhodu stříkání v prostředí inertních plynů, což vedlo ke snížení oxidace natavených částic při letu vzdušnou atmosférou a při dopadu na základní materiál. Teploty za použití této metody dosahovali hodnot převyšující hranici 17 000 °C, které byly dostačující k tavení veškerých známých materiálů. Základní všeobecnou podstatou různých druhů žárových nástřiků využívaných pro vytvoření ochranných povlaků je nanášení materiálu ve formě prášku nebo drátu, který je přiváděn do zařízení, ve kterém je materiál natavován a vysokou rychlostí nanesen na základní materiál s předem vhodně upraveným povrchem ve vrstvách o tloušťce 50 µm a větší.<sup>1 2</sup>



Obrázek 1 Princip utváření žárového nástřiku.<sup>3</sup>

Tyto vrstvy mají z pravidla lamelární strukturu tvořenou tzv. splaty kvůli principu nanášení. Paprsek natavených, částečně natavených a zoxidovaných částic dopadající na substrát v něm mechanicky zakotví za pomoci adhezních sil (úprava povrchu se provádí například tryskáním různými médii o předepsané zrnitosti). Princip je graficky znázorněn na obrázcích 1, 2 a 3.<sup>3</sup>

Obrázek 2 Princip procesu nanášení.<sup>4</sup>Obrázek 3 Řez povlaku a popis jeho složek<sup>5</sup>

Přilnavost povlaku k substrátu je zpravidla nejvíce ovlivněna meziatomovými vazbami, mechanickým zakotvením, vznikem lokálních svarů a difúzí.

Mezi nežádoucí částice ve výsledném povlaku se mohou zahrnout:<sup>1 2</sup>

- Zoxidované částice – objevují se především u kovů s vyšší afinitou ke kyslíku za předpokladu kontaktu s vnější atmosférou

- Nenatavené částice – nedostatečné natavení některých částic může zapříčinit špatné nastavení podávacích parametrů nebo také nedostatečná stejnorodost zrnitosti prášku, která je velmi důležitá ve spojitosti s kvalitou nanesené vrstvy. Příliš velké, tudíž i těžší částice se mohou dostat přímo do středu proudu plamene, což způsobí nežádoucí nenatavení vlivem nižší teploty. Je proto důležité dbát na kvalitu prášku.
- Póry a nespojitosti – nespojitost splatů a pórovitost vzniká zejména z důvodu špatně zvolených parametrů jako například nevhodně zvolený úhel nanášení nebo dalším výrazným faktorem ovlivňující nespojitost je provedení předúpravy základního materiálu před nanášením.

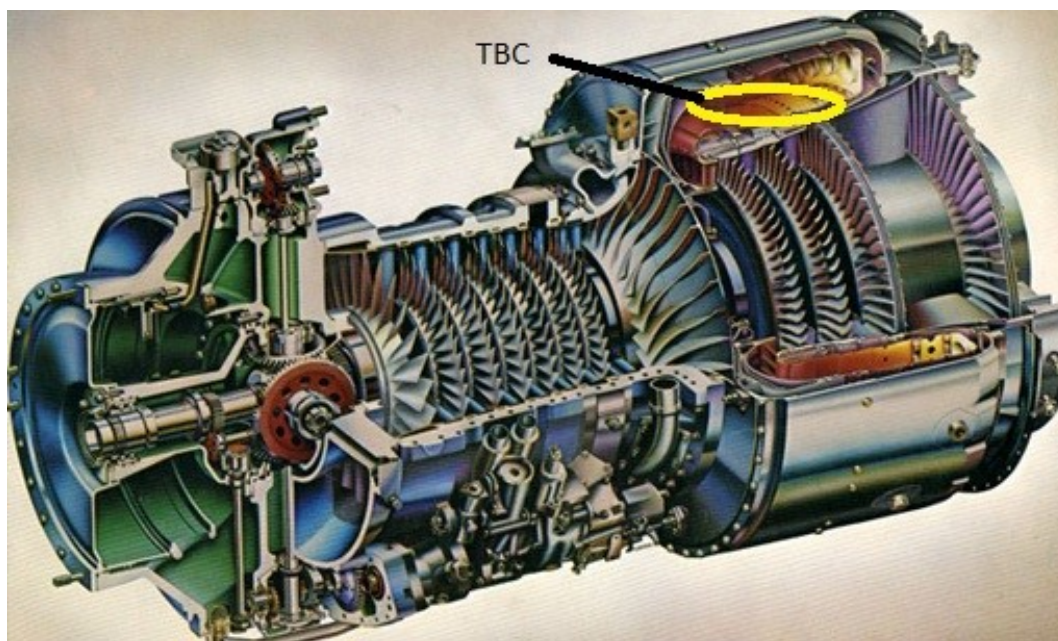
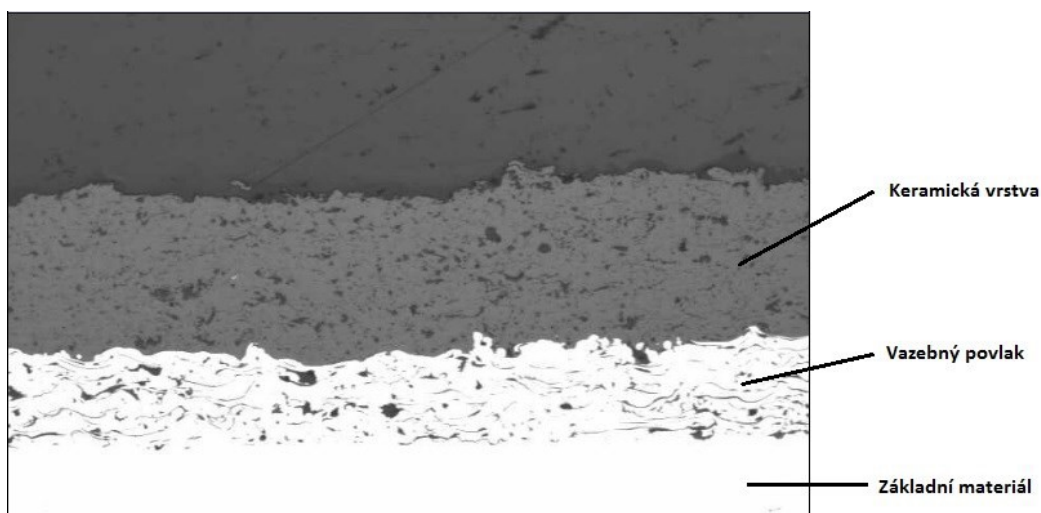
## 1.2 Typy nástřiků

Pro letecký průmysl jsou nejvyužitelnější následující tři typy nástřiků:

- Tepelné bariéry (TBC – Thermal Barrier Coating)
- Povlaky odolné proti opotřebení
- Obrusitelné těsnící povlaky (Abradable)

### 1.2.1 Tepelné bariéry (TBC – Thermal Barrier Coating)

Hlavní úkol tohoto typu nástřiku je pokles pracovních teplot exponované součásti. Jako další výrazné přispění se může považovat ochrana proti oxidaci a korozi. V leteckém průmyslu se tepelné bariéry používají primárně na dynamicky nenamáhaných součástech jako např. prvky, které usměrňují horký proud spalin nebo části spalovacích komor. Tepelné bariéry mají z důvodu křehkosti keramické vrstvy určitá omezení použití na již zmíněných dynamicky zatížených součástech. Další omezení vyplývá z předpokladu zvýšeného pnutí při pracovních teplotách leteckého motoru, tudíž materiály vrstev tepelných bariér musí mít podobný koeficient tepelné roztažnosti, aby se zamezilo trhlinám a jiným poškozením ochranné vrstvy. Nejběžněji používané funkční (vrchní) vrstvy jsou na bázi  $ZrO_2$  v rozhraní 6 - 8 hm.%. Vazební (spodní) vrstva pak na bázi PtAl, NiCrAlY, NiCoCrAlY, CoNiCrAlY nebo CoCrAlY. Při kombinování těchto složení je možné ovlivnit míru odolnosti proti oxidaci či korozi.<sup>6</sup>

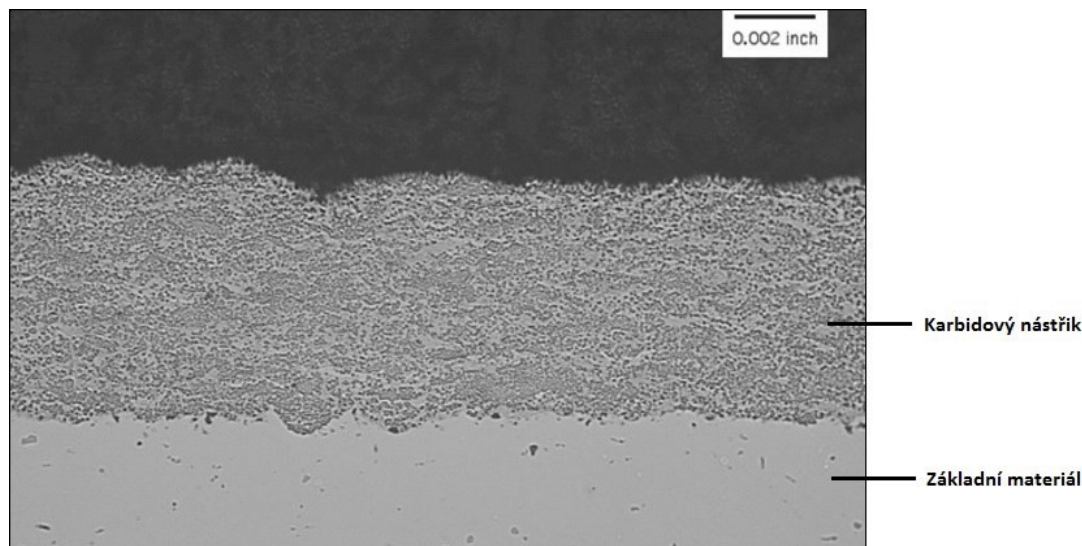
Obrázek 4 Ukázka nástřiku tepelné bariéry<sup>7</sup>Obrázek 5 Metalografický výbrus nástřiku tepelné bariéry<sup>8</sup>

### 1.2.2 Povlaky odolné proti opotřebení

Použití povlaku proti opotřebení se uplatňuje především na uložení, jež vyžadují vysokou životnost a odolnost. Tento povlak se skládá pouze z jedné vrstvy, která se aplikuje na spojovací části leteckých turbín.<sup>6</sup>

Materiál povlaku se skládá z oxidů kovů a karbidů. Karbid je vyráběn ve formě cermetu (kov a keramika). Tento materiál zabezpečuje požadovanou odolnost a tvrdost spoje.

Charakter materiálu je podobný slinutým karbidům, jež se používají v řezných nástrojích pro obrábění. Velmi odolným povlakem je karbid wolframu, který způsobí vysokou tvrdost povlakové vrstvy. Hranice tvrdosti u povlaku na bázi wolframu může dosahovat až 73 HRC a je také velmi dobře odolná vůči vysokým teplotám (až 650 °C).<sup>6</sup>



Obrázek 6 Metalografický výbrus povlaku odolného proti opotřebení<sup>8</sup>

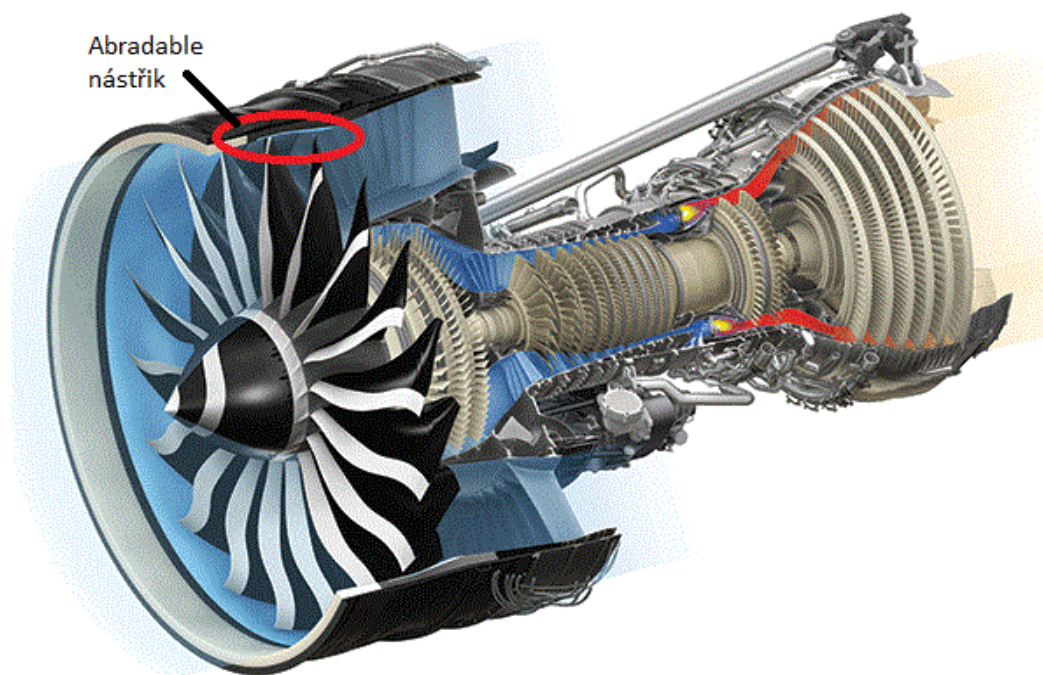
### 1.2.3 Obrusitelné těsnící povlaky (Abradable)

Obrusitelný povlak není specifický pouze pro letecký průmysl. Jeho uplatnění můžeme najít i v jiných oblastech, jež využívají technologii turbín jako například čerpadla, turbodmychadla, turbokompresory nebo spalovací turbíny.<sup>6</sup>

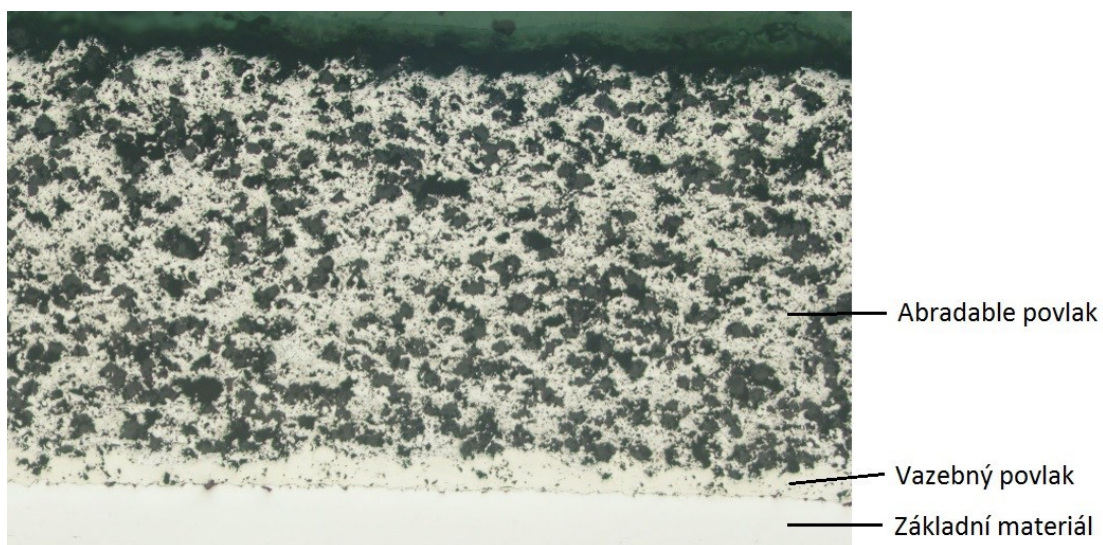
Tento druh povlaku napomáhá vymezování vůlí a utěsnění mezi rotačními částmi jako jsou lopatky turbín a jejich pláštěm. Tím napomáhá ke zvýšení termodynamické účinnosti a zamezení nežádoucích ztrát celého systému.<sup>6</sup>

Povlak tvoří dvě vrstvy z nichž tu vrchní tvoří abradable povlak, který je vytvořen na bázi nikl – grafitu. Pracovní teploty se pohybují až okolo 800 °C, což při tloušťkách povlaku 2 mm zajišťuje dostatečnou životnost těsnící výstelky. Spodní vazná vrstva zaručuje velmi dobrou adhezní přilnavost nástřiku k základnímu materiálu.<sup>9</sup>





Obrázek 7 Ukázka použití ohrusitelného těsnícího nástřiku<sup>10</sup>

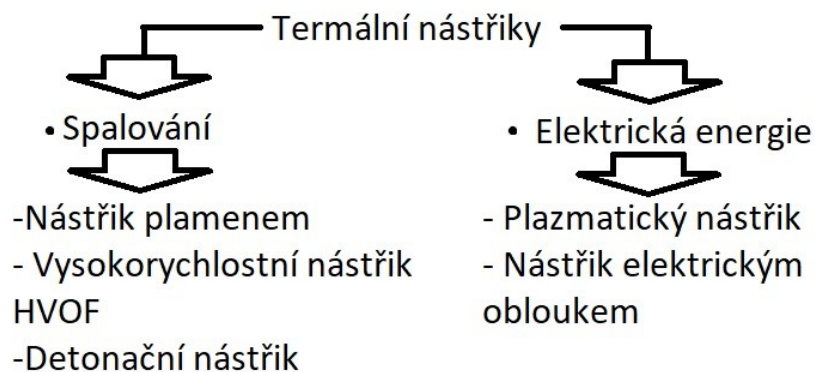


Obrázek 8 Metalografický výbrus ohrusitelného nástřiku<sup>8</sup>



### 1.3 Rozdělení a druhy žárových nástřiků

Metody žárových nástřiků se mohou nejpraktičtěji rozdělit v návaznosti na druh použitého zdroje tepelné energie, který je použit k natavování přídavného materiálu v odlišných formách (prášek, drát).<sup>1</sup>



Obrázek 9 Rozdělení metod termálního nástřiku

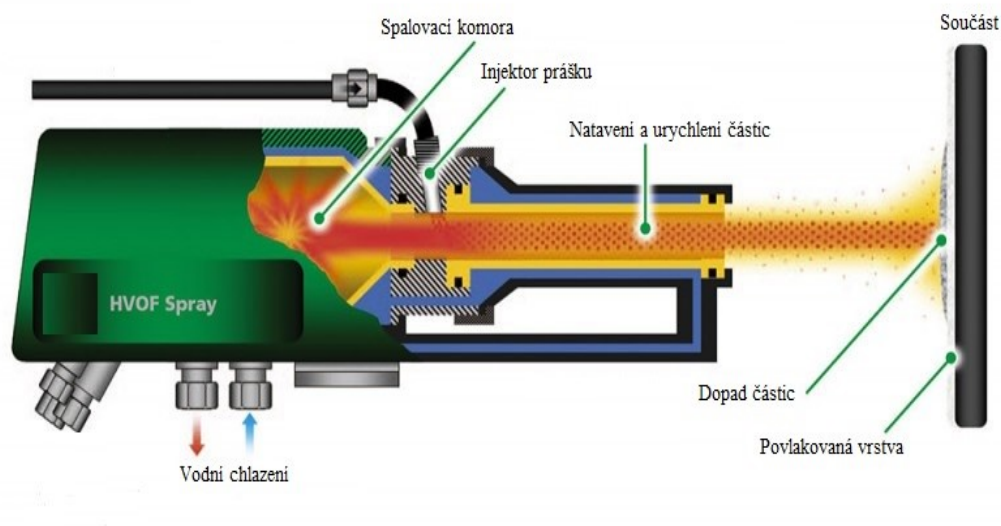
#### 1.3.1 Žárový nástřik plamenem

Metoda nástřiku plamenem je jedna z nejstarších používaných metod v oblasti žárového nanášení. Jako zdroj tepelné energie se využívá kyslík nebo vzduch podávaný pod tlakem s kombinací vznětlivých plynů jako jsou vodík, propan, butan nebo acetylen. Do ústí plamene hořících plynů je podáván materiál v podobě drátu nebo prášku, který je natavován a kineticky urychlen k nanášené součásti. Jedna z nevýhod je nízká tavící teplota podávaného materiálu, což dovoluje použít materiály tavící se pouze za nízkých a středních teplot jako hliník, měď, bronz, zinek nebo různé oceli. Výsledná kvalita nástřiku v případě použití drátu není vysoká z důvodu nízké přilnavosti a hustoty. V případě použití prášku je míra hustoty povlaku mírně lepší. Výjimku tvoří tzv. nízkotavitelné polymery, které dosahují podstatně lepších výsledků těchto hodnot. Tyto nevýhody jsou kompenzovány podstatně nižší pořizovací a provozní cenou zařízení díky jeho jednoduchosti a tím tato metoda nachází širší uplatnění u méně náročných aplikací. Provedení podávacího zařízení může být v podobě zásobníku navázaného přímo k hořáku, což umožňuje vyšší flexibilitu v pohybu během nanášení nebo v podobě větších zásobníků, které umožní doplňování přídavného materiálu i za chodu zařízení a tím i nepřetržitý chod.<sup>1 2</sup>

Obrázek 10 Zařízení pro nástřik plamenem<sup>11</sup>

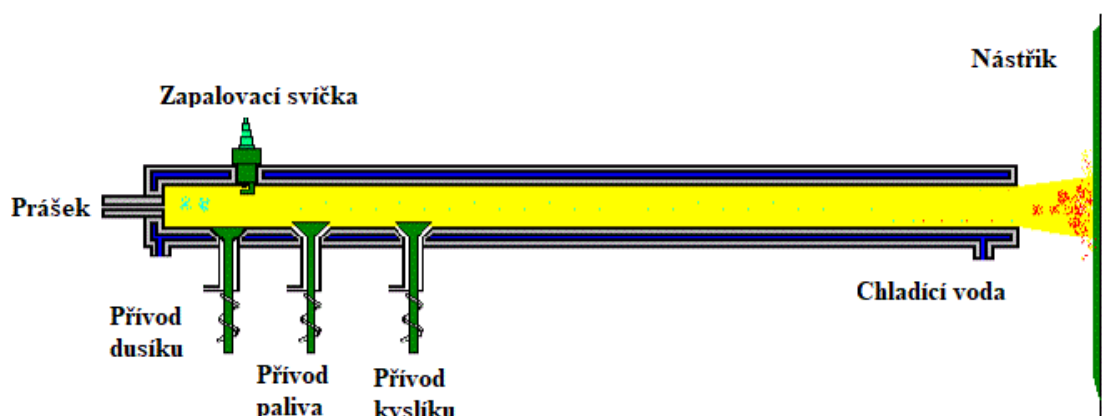
### 1.3.2 Vysokorychlostní nástřik HVOF

Vysokorychlostní nástřik se řadí mezi specifické metody díky jeho schopnosti urychlit natavené částice k základnímu materiálu rychlostí pohybující se od 200 do 1000 m/s. Extrémně vysoká rychlost natavených částic je způsobená speciálním tvarem podávací trysky hořáku, jež má konvergentně divergentní tvar. Díky tomu se podávací prášek dostane do nepřetržitě hořícího supersonického plamene tvořeného ze směsi kyslíku a paliva, které může představovat plyny jako vodík, acetylen, propylen nebo kupříkladu kerosin. Jako nosný plyn pro prášek je běžně použit dusík. Natavení prášku zde probíhá jako v jedné z mála metod již uvnitř trysky, kde se natavené částice urychlí na výše zmiňovanou rychlost. Jako nevýhoda se jeví nižší maximální dosažitelná teplota natavování, která se pohybuje v rozmezí od 3000 do 5000 °C, a tudíž je metoda nepoužitelná pro nanášení keramických prášků, ale z toho vyplývá výhoda zamezení oxidace nebo možnost pro vytvoření prostředí pro fázové přeměny a v neposlední řadě vyhoření částic prvků o nižší teplotě tavení. Projevem vysoké rychlosti natavených částic je jejich vynikající nanesení a zakotvení na základní materiál a s tím související výborná hustota nanesené vrstvy. Při správně nastavených parametrech nástřiku je možné dosáhnout až dvou procentní pórovitosti. HVOF je vhodný pro použití kovových prášku o nízkých nebo středních teplotách tavení a díky zamezení oxidace také pro nástřik karbidů a cermetů převážně chromu, titanu nebo wolframu. Metoda se také pyšní vysokou adhezní přilnavostí naneseného nástřiku a to až k hodnotám 82 MPa. Podstatnou nevýhodou je vysoká pořizovací cena celého zařízení a také velmi vysoká provozní hluchnost, jež dosahuje hodnot přes 110 dB.<sup>12</sup>

Obrázek 11 Zařízení pro HVOF nástřik<sup>13</sup>

### 1.3.3 Detonační nástřik

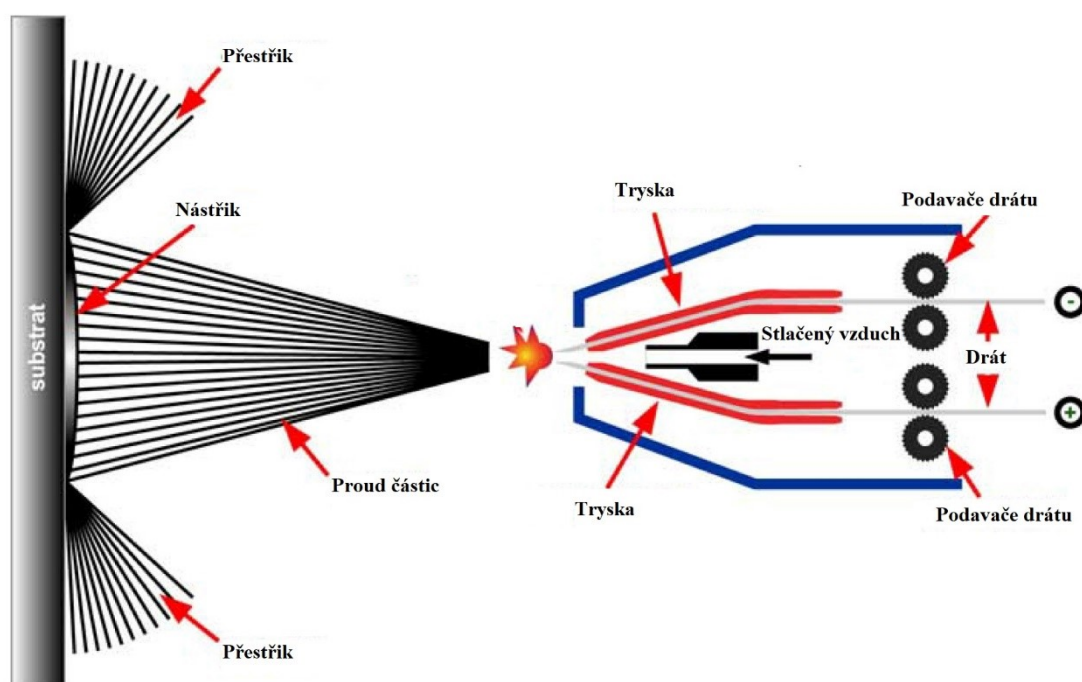
Návrh konstrukce konvenčního flame spreje limituje schopnost dostatečně hustého nástřiku povlaku neboli s dostatečně nízkou porezitou, která by byla menší než 2%. Oproti tomu detonační nástřik produkuje vyšší termální i kinetickou energii při nanášení pomocí omezeného spalování v trubici, v které je prášek dopravován. Tento návrh produkuje lepší prohřátí a hybnost při transferu částic prášku. D-gun (vynalezen společností Union Carbide, dnes už Praxair Surface Technologies v Indianapolis) byla první a rozšířeně známa forma detonačního nástřiku. Detonační nástřik je schematicky zobrazen na obrázku 12. Proces probíhá za pomoci explozivní směsi paliva, kyslíku a prášku, která je vedena dlouhou trubicí a vznícena pomocí zapalovací svíčky. Výsledná tlaková vlna detonace zahřívá a zrychluje obsažené částice prášku, které cestují dál vodou chlazenou trubicí přímo k substrátu. K pročištění dopravní trubice mezi detonacemi je využit dusík. Cyklus čištění, injekce a detonace je opakován s frekvencí od 3 do 6 Hz. Detonační procesy nanášení využívají vyšších teplot a poskytnutí delší doby pro roztavení částic nanášeného materiálu, než proces flame spray. Frekvence a výše zvukové hladiny procesu (145+ dB) je spojena s požadavkem odhlučnění například pomocí zvukotěsných kabin. Roztavené částice mohou dosahovat rychlosti přesahující 800 m/s. Takto dosažená rychlost roztavených částic zapříčiní jejich dostatečnou deformaci na povrchu substrátu a tím je dosažena velmi nízká míra porezity výsledného povlaku.<sup>12</sup>

Obrázek 12 Schéma průběhu detonačního nástříku<sup>14</sup>

### 1.3.4 Arc Spray

Arc spray (jinak také zvaný twin-wire arc) je metoda vynalezená M. U. Schoopem v roce 1910. Tato metoda v té době nedosáhla širšího komerčního využití až do 60. let 20. století. Na rozdíl od ostatních termických procesů, které nepřímo zahřívají částice využitím rozehrátého proudu plynu, proces arc spray využívá elektrického oblouku vytvořeného stejnosměrným proudem (dc) působícím mezi dvěma spotřebními dráty, jenž slouží jako elektrody a přímo se roztavují. Elektrický oblouk je tvořen mezi špičkami těchto dvou drátů, které jsou kontinuálně přiváděny do ústí hlavice. Proces je schematicky zobrazen na obrázku 13. Protože dráty jsou přímo roztavovány díky elektrickému oblouku, tepelná účinnost metody arc spray je značně vyšší než u kteréhokoli jiného termického procesu. Tryska se stlačeným vzduchem umístěná za pomyslným průsečíkem drátů odvádí pryč roztavený kov v množství, v jakém jsou průběžně dopravovány do elektrického oblouku. Rozsah průtoku stlačeného vzduchu se pohybuje v rozmezí od 0,8 do 1,8 m<sup>3</sup>/min při tlaku až do 690 kPa (100 psi). Roztavený a oddělený kov od drátu atomizuje a rozbíjí se do podoby jemných částic tvořící paprsek jemných kapiček roztaveného materiálu. Atomizovaný vzduch je také použit k akceleraci částic směrem k povrchu substrátu, kde roztavené částice dopadají, deformují se, tuhnou a tvoří výsledný povlak. Na rozdíl od metody flame spray nebo nanášení pomocí plazmy jsou už částice roztaveny, když je materiál odebrán a unášen v proudu a na rozdíl od ostatních procesů jsou částice ochlazovány hned, jakmile opouštějí zónu elektrického oblouku. Za požadavkem minimalizace oxidace u nanášení procesem arc spray doba přesunu částic musí být co nejkratší, čímž lze dosáhnout co nejkratším možným distancem a co nejvyšším tlakem atomizovaného vzduchu. Obrázek 13 ilustruje kontinuální

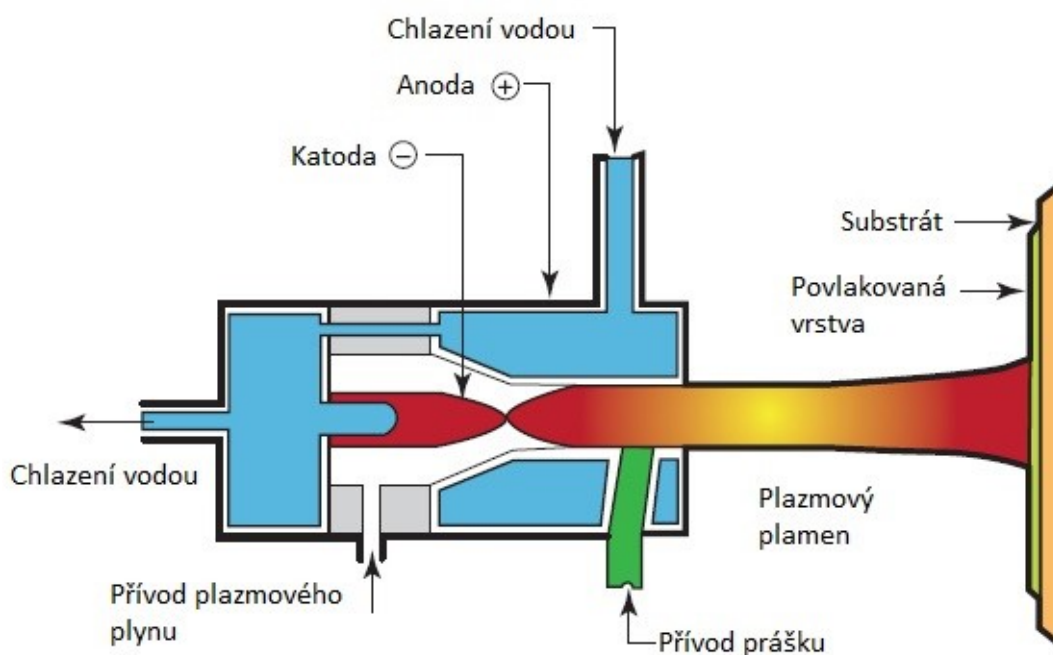
přenos rozpuštěného kovu opouštějící špičky drátů, který je unášen za pomoci proudu vzduchu. Arc spray přenáší méně tepla než ostatní konvenční metody termického nanášení díky absenci proudu ohně nebo plazmy. Jediné teplo vstupující do povlakovaného dílce je prostřednictvím jednotlivých částic v rozprašovaném proudu. Velikost částic se zvyšuje se snižujícím se napětím, se snižujícím se průtokem atomizovaného vzduchu, jenž akceleruje částice a se zvyšujícím se průměrem přiváděného drátu. Dále bylo zjištěno, že velikost roztavených částic se pohybuje v rozmezí submikronů (mlhy) až do 200  $\mu\text{m}$  v závislosti na zvolených parametrech a jejich tvar je převážně kruhovitý. Použití materiálu je omezeno pouze na ty, které jde vyrábět ve formě drátu. Zdroj zařízení využívá napětí k vytvoření elektrického oblouku o podobných hodnotách jako při svařování, ale nejvýkonnější systémy využívají hodnot od 400 A až do 1500 A stejnosměrného proudu.<sup>12 15</sup>



Obrázek 13 Schéma průběhu arc spray nástřiku<sup>16</sup>

### 1.3.5 Plazma

Plazma často nazývaná jako čtvrté skupenství, obvykle tvořené neutrálními atomy, pozitivními ionty a volnými elektrony. Plazma je tvořena přemísťováním energie do plynu, dokud úroveň energie nestačí k ionizaci plynu, což umožní elektronům a iontům působit nezávisle na sobě. Stav plazmy je možné dosáhnout v případě, že se pod elektrickým polem mohou udržovat proudy, jimiž se volné elektrony mohou pohybovat ionizovaným plynem. Jakmile je odběr energie odstraněn, elektrony a ionty se rekombinují a uvolňují světlo a tepelnou energii. Ve stejnosměrném plazmovém oblouku je zahřívání plynem dostatečné k vytvoření teploty jádra plazmatu přesahující 20000 °C v závislosti na vlastnostech plynu. Nanášení pomocí plazmy je nejpružnější proces ze všech termických metod nanášení s ohledem na použité materiály, které touto metodou mohou být nanášeny, a to díky inertním plynům, vysoké rychlosti plynů a extrémně vysokých teplot.<sup>1 17 19</sup>



Obrázek 14 Schéma procesu plazmatického nástřiku<sup>18</sup>

Základní součásti a provedení hořáku jsou zobrazeny na obrázku 14. Plazmový hořák kombinuje axiálně uspořádanou katodu (vyrobenou například z hafnia) a anodu/trysku (vyrobenou typicky z mědi). Hafnium (Hf) se používá jako katoda ze dvou důvodů, a to kvůli vysoké teplotě tání (2233 °C) a za druhé je dobrým termionickým emitorem a snadno

uvolňuje elektrony, aby se udržel výboj. V typickém případě hrot zahříváného hafnia pracuje v blízkosti jeho bodu tání kvůli vysoké hustotě elektronového proudu, který místně zahřívá hrot katody. Vodou chlazená měděná anoda (tryska) prostorově stabilizuje oblouk a zrychluje expandující vyhřívané plyny. Katoda se spoléhá na dobré vedení a vysokou teplotu tání hafnia, aby přežila vysokoteplotní oblouk, protože není přímo chlazená vodou. Plazmové obloukové děla s přímým proudem jsou intenzivně chlazeny demineralizovanou vodou, aby se zabránilo tavení a minimalizovalo se erodování katody a anody. Plazmu formující plyny se zavádějí přes zadní stranu hořáku. Typicky tyto plyny vstupují do obloukové komory prostřednictvím plynové kroužku (vstřikovacího ventilu plynu), kde vytváří vířivý proud. Vír stabilizuje elektrický oblouk na špičce katody v jeho nízkotlakové oblasti a otočí kořen oblouku na anodě. Tento jev se nazývá stabilizace víru. Rotace stálého anodového oblouku také přispívá k minimalizaci eroze na anodě. Vnesené plyny tak procházejí skrz oblouk. Ohřáté plyny expandují radiálně i axiálně, čímž zvětšují svůj objem a vystupují tryskou. V závislosti na poměru tlaku mezi protiproudou oblastí elektrického oblouku a východem trysky, která je orientovaná po proudu, plyny (proud plazmy) expandují subsonicky nebo supersonicky. Mnoho návrhů hořáků využívá konvergentně-divergentní trysku k dosažení nadzvukové expanze, která zvyšuje rychlost částic. Jiné konstrukce úmyslně zpomalují k podzvukovým rychlostem, aby se prodloužila doba nanášení materiálu.<sup>1 19 20</sup>



## 2 Teorie potřebná k obrábění

Mechanismus tvoření třísky dokazuje vznik stavu napjatosti obráběného materiálu během procesu vniku řezného klínu do obráběného materiálu. V následném mezním stavu napjatosti dochází k oddělení třísky. V průběhu procesu se sledují především elastické a plastické deformace ale i poměry řezným sil. Z hlediska dynamické stability prostředí a také pevnosti a tuhosti celého řezného prostředí je důležité sledovat tyto silové poměry, které pomáhají kontrolovat mechanické namáhání řezné soustavy. Hlavní roli také hrají při získání potřebných hodnot pro určení trvanlivosti řezného nástroje, energetické účinnosti celého ústrojí, souvislostí tepelných jevů, příkonu zařízení pro obrábění až po určení podmínek přesnosti. Nejvýznamnější veličinou při řezném procesu je obráběcí síla  $F$ . Je to veličina proměnná v čase, která udává sílu potřebnou k překonání řezného odporu  $R$ , jenž klade obráběný materiál na nástroj v průběhu tvorby třísky.<sup>21</sup>

Podmínka rovnováhy vyžaduje:

$$F = -R [N] \quad (2.1)$$

Obráběcí síla v průběhu procesu není stálá, ale kolísá v rozmezí až 20 % z důvodu rozptylu mechanických vlastností obráběného materiálu, a to i při snaze udržení konstantních řezných podmínek.<sup>21</sup>

Síla  $F$  je výslednicí aktivní složky  $F_1$  a pasivní složky  $F_2$ , přičemž aktivní složka  $F_1$  se dále rozkládá na posuvovou složku  $F_f$  a řeznou složku  $F_c$ . Rozklad těchto sil při podélném soustružení je možné sledovat na obrázku 15.<sup>21</sup>

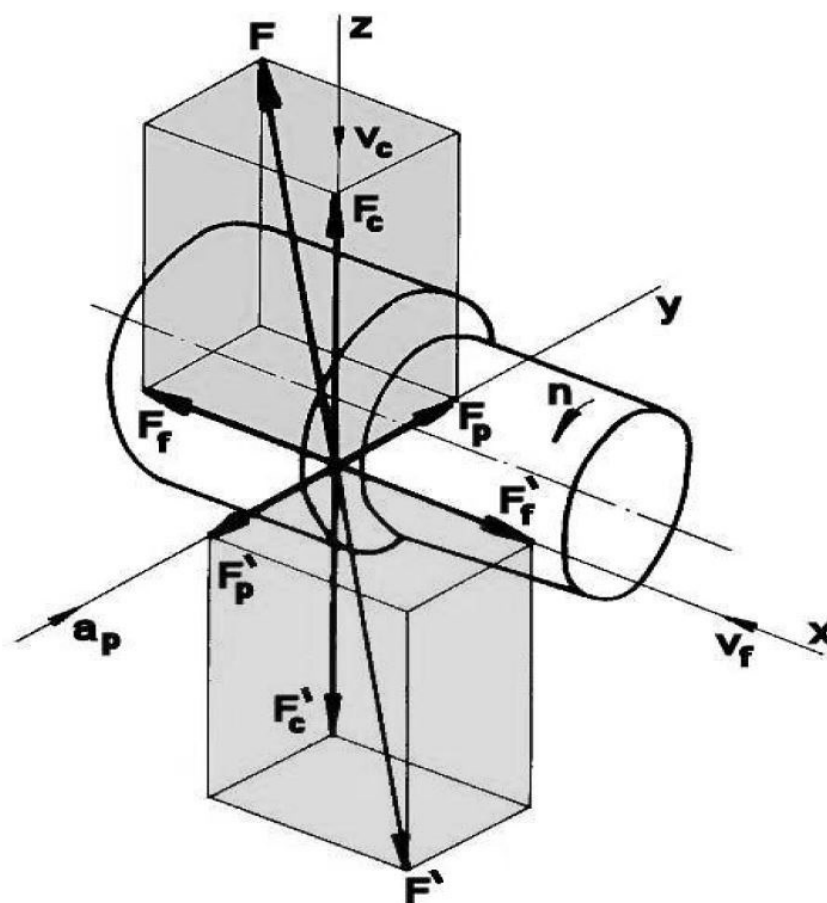
Hlavní řezná síla a složky k ní vztažené se v případě podélného soustružení dají vypočítat podle následujících vztahů:<sup>21</sup>

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} [N] \quad (2.2)$$

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} [N] \quad (2.3)$$

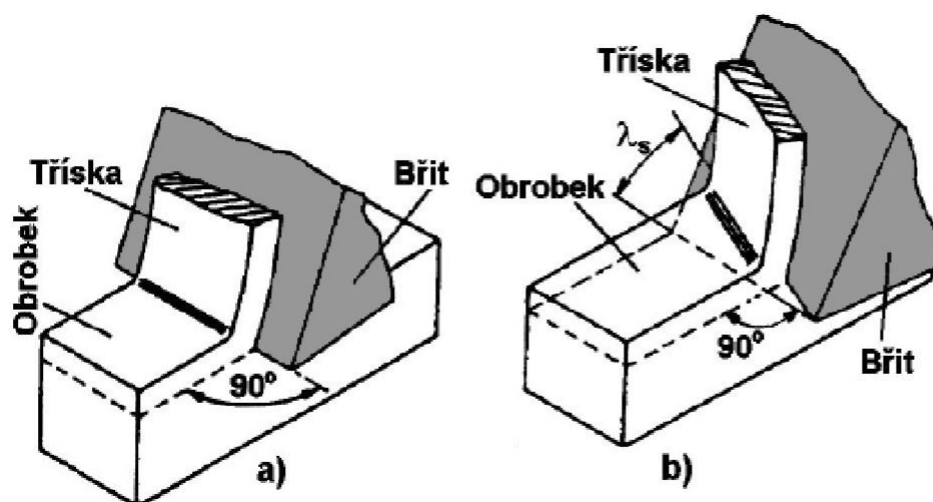
$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} [N] \quad (2.4)$$



Obrázek 15 Složky řezných sil a jejich rozložení<sup>22</sup>

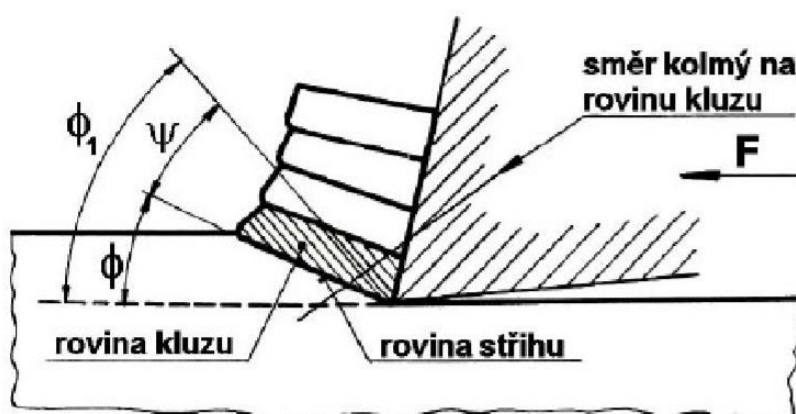
## 2.1 Fyzikální rozbor procesu řezání

U tohoto procesu řezný nástroj působí na obráběný povrch a tím způsobuje stav napjatosti v materiálu a proti tomuto napětí klade materiál přímo úměrný odpor. Řezný proces lze uskutečnit ortogonálním nebo obecným způsobem jak je možné vidět na obrázku 16. Při ortogonálním řezání je břit v kolmé poloze vůči směru řezného pohybu. Ukázkou tohoto typu řezného procesu je například zapichování. Díky kolmosti na směr řezného pohybu je možné příklady řešit v rovině. V případě obecného řezání je už nutné řešit problematiku v prostoru a jeho hlavními představiteli jsou vrtání, soustružení atd.<sup>22</sup>



Obrázek 16 Řezný proces uskutečněný a) ortogonálním řezáním b) obecným řezáním<sup>22</sup>

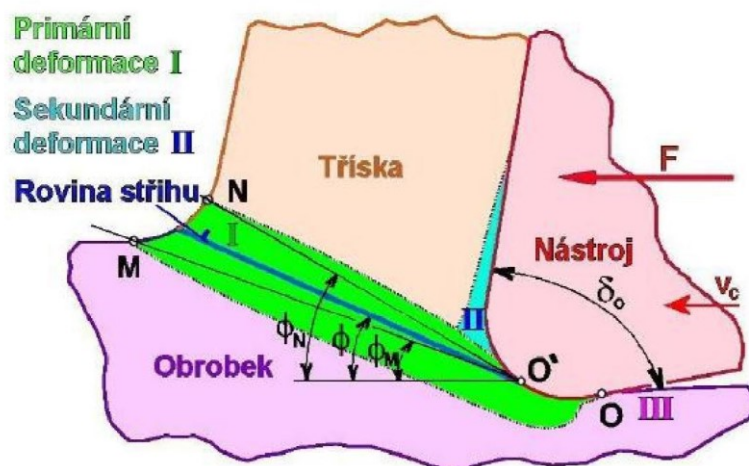
V okolí utváření třísky se uskutečňují pružné a posléze plastické deformace díky vniku břitu do materiálu. Smyková napětí se zvětšují až do doby, kdy dochází k plastické deformaci obráběného materiálu. Jedná se o posuv odebíraných vrstev v kluzných rovinách pod úhlem  $\phi_1$ . Při pokračování a opakování tohoto jevu dochází k pěchování a posouvání vrstev materiálu a k oddělení materiálu dochází až napětí vzroste na hodnotu meze stříhu odebíraného materiálu.<sup>22 23</sup>



Obrázek 17 Utváření třísky<sup>22</sup>

Plastické a pružné deformace při vniku nástroje do materiálu je možné sledovat ve třech následujících oblastech:<sup>22 23</sup>

- Oblast primární plastické deformace před ostrím nástroje značená římskou číslicí I
- Oblast sekundární plastické deformace, která se nachází v povrchové vrstvě, kde se tříska dotýká čela nástroje a značí se římskou číslicí II
- Oblast terciální plastické deformace, kterou tvoří povrchová vrstva už obrobeného materiálu značená římskou číslicí III



Obrázek 18 Oblasti plastických deformací<sup>22</sup>

Rozsah primární plastické deformace a její tvar jsou nestálé. Ovlivňují ji především fyzikální vlastnosti opracovávaného předmětu. Se zvyšující se posuvovou rychlostí  $v_f$  a řeznou rychlostí  $v_c$  je oblast primární plastické deformace menší, čehož je v pozitivním smyslu využíváno při vysokorychlostním obrábění (HSC). Další faktory, které ovlivňují tuto oblast jsou chlazení během řezného procesu nebo geometrie řezného nástroje.<sup>22</sup>

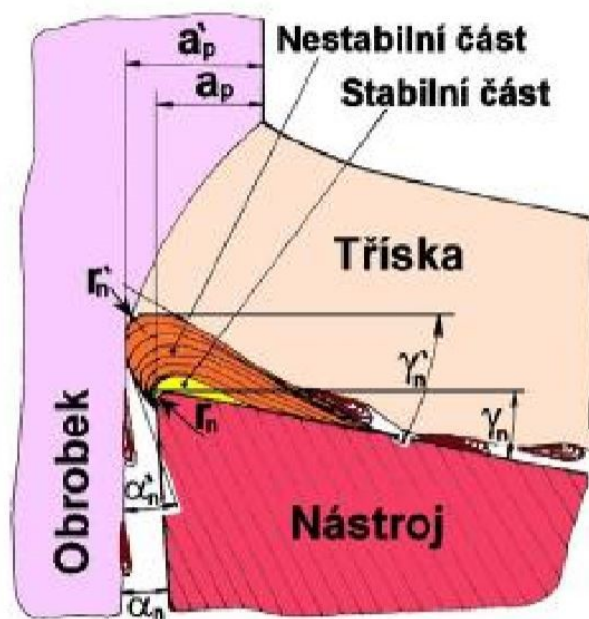
Úhel čela  $\gamma_n$  značně ovlivňuje proces odchodu třísky a to tak, že při jeho zvětšení se zmenšuje odpor odebírané třísky vůči nástroji a její celková deformace je nižší. Dále například zvětšení nástrojového úhlu  $\kappa_r$  zapříčiní nižší koeficient pěchování třísky a to z důvodu zmenšení šířky odebírané třísky.<sup>22 37</sup>

Celkový souhrn jevů, které jsou zaviněny plastickou deformací:<sup>22</sup>

- Zbytková napětí povrchové vrstvy po odebrání materiálu
- Ovlivnění řezného ústrojí teplem
- Oddělení materiálu v oblasti primární plastické deformace
- Pěchování třísky

- Opotřebení na hřbetu a na čele nástroje
- Celkové mechanické zatížení řezného nástroje

Mezi odebíranou třískou a čelem nástroje se produkuje značná třecí síla, která přispívá k ulpění určité části odebíraného materiálu, který tvoří tzv. nárůstek. Tvar nárůstku a jeho schopnost ulpění na čele nástroje závisí na řezných podmínkách a na druhu obráběného materiálu. Nárůstek vlivem velmi silného pěchování při procesu se stává tvrdším, než obráběný materiál a tím může dočasně převzít roli řezného nástroje, což vede k rozměrově nestálosti procesu, protože se zvětšujícím se nárůstkem se také zvyšuje hloubka úběru třísky  $a_p$  a také se mění výsledná řezná geometrie. Vznikání a zanikání nárůstku probíhá periodicky s frekvencí v intervalu od  $10^2$  Hz do  $10^3$  Hz. Při zániku nárůstku je jeho převážná část odváděna spolu s třískou po čele nástroje a zbytek nárůstku ulpívá na obrobené ploše, což zhoršuje její strukturu.<sup>22 37</sup>



Obrázek 19 Schéma vzniku nárůstku<sup>22</sup>

Dalším negativním účinkem tvorby nárůstku je možnost způsobení samobuzeného kmitání soustavy stroj-nástroj-obrobek. Materiál, při jeho obrábění se nárůstek nejčastěji tvoří je hliník a jeho slitiny. Naopak u litin, které mají nízkou míru plasticity je vznik nárůstku téměř zanedbatelný. Vznik nárůstku je nejčastěji sledován při řezných rychlostech menších než  $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a při vyšších rychlostech nad  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . K zamezení vzniku

nárůstku je tedy možné dosáhnout upravením vhodné řezné rychlosti, použitím vhodného chladicího média nebo třeba lapováním čelní plochy řezného nástroje.<sup>22</sup>

## 2.2 Přerušovaný proces řezání

Při přerušovaném procesu řezání je břit nástroje cyklicky zatěžován a periodicky se nachází v záběru obráběného materiálu a zase z něj odchází. Princip přerušovaného řezání je možno sledovat především u frézování, kdy fréza složená z několika břitů, jenž periodicky najíždějí a vyjíždějí z materiálu, odebírají třísku z obrobku. Další možnost simulace přerušovaného řezu je při podélném soustružení, kdy na obrobku je v jeho podélném směru například drážka nebo otvor.<sup>23</sup>

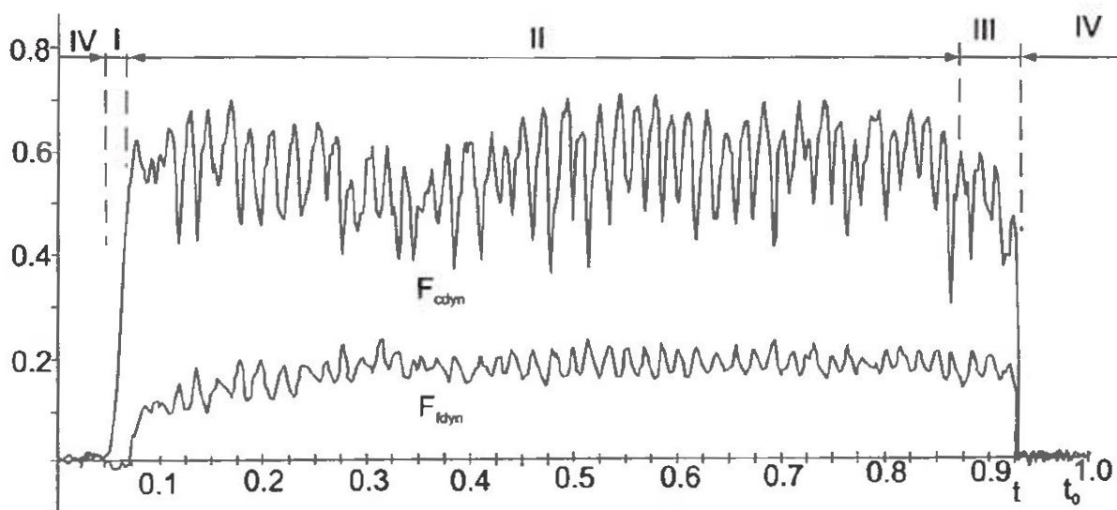
Proces přerušovaného řezu klade vysoký důraz na houževnatost a pevnost v ohybu, která by měla být velmi vysoká na rozdíl od plynulého procesu řezání, kdy se naopak klade vyšší důraz na vysokou houževnatost nástroje a schopnost nízké kumulace tepla.<sup>23</sup>

Fáze přerušovaného řezného procesu mohou být jednoduše rozděleny do čtyř jednotlivých fází:<sup>23</sup>

- Vstupní fáze
- Stacionární fáze
- Výstupní fáze
- Fáze uvolnění

Největší vliv v přerušovaném řezném procesu mají fáze vstupní, výstupní a fáze uvolnění a to především na celkové fungování řezného nástroje a na jeho opotřebení, jenž je součástí řezného procesu.<sup>23</sup>

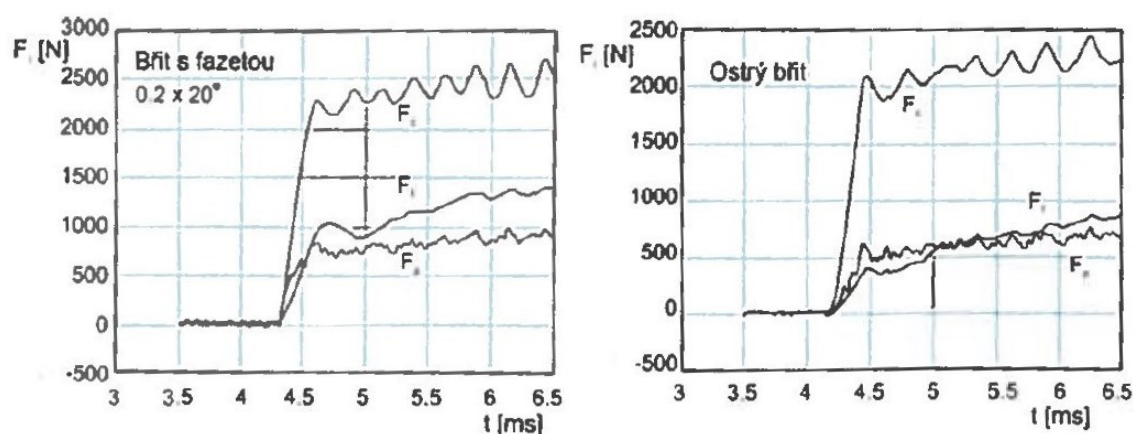
Řezné síly a jejich rychlost akcelerace v případě přerušovaného řezu je v řádu  $10^6 - 10^7$  N/s a co se týká řezání plynulého, konkrétně při vstupní fázi nástroje, je hodnota rychlosti akcelerace v řádu  $10^2 - 10^4$  N/s, což je podstatně nižší hodnota. To souvisí s vlivem nástroje a to tak, že během plynulého procesu jako například podélné soustružení má dominantní efekt na funkčnost řezného nástroje a jeho opotřebení stacionární fáze.<sup>23</sup>



Obrázek 20 Obrázek zobrazující graf řezných sil  $F_c$  a  $F_f$  v přerušovaném řezném procesu jako funkci času (rozsah osy  $y$   $F_i = 0,1 \leftrightarrow 530 \text{ N}$ )<sup>23</sup>

Na obrázku 20 je možno pozorovat přerušovaný proces řezání a v jeho vrchní části jednotlivé fáze řezání v časové ose pod římskými číslicemi. Během první fáze nebo také řezné fáze vstupní můžeme pozorovat rostoucí zatížení od nulové hodnoty až na střední hodnotu na řezném nástroji a jeho aktivním povrchu. Tato hodnota zpravidla překračuje průměrnou hodnotu druhé fáze neboli stacionární fáze, ve které ve většině případů začíná docházet ke tvorbě třísky. V případě, že tloušťka odebírané třísky je konstantní, tak řezná síla osciluje kolem stacionární hodnoty. Tento jev je možné dobře sledovat v případě podélného soustružení nespojitého obrobku, který je opatřen například drážkou. Řezný proces se v průběhu stacionární fáze stává stabilním v průběhu počátečních 2 nebo 3 sekund a řezná síla  $F_c$  má klesající tendenci po dobu stoupání procesní teploty řezání. Může se také počítat s tím, že počáteční opotřebení, jenž se zde pozvolna objevuje, upravuje topografii řezného nástroje, přesněji jeho povrchu, a to v závislosti na vlastnostech materiálu vybraného obrobku. Dále zde nastává jev, při kterém materiál obrobku ulpívá pomocí adhezních sil na aktivních plochách řezné destičky, a to díky zvětšení plochy aktivního kontaktu. To jasně vede ke zvýšení řezných sil. V případě plynulého procesu řezání se řezná síla jeví jako konstantní asi po 20 sekundách. Nejvýznamnějším faktorem ovlivňující změny velikosti řezné síly je opotřebení nástroje nebo plastická deformace, ovšem v ustáleném procesu se může počítat s výchyly řezných sil okolo 2 – 3 %.<sup>23</sup>

Dalším důležitým faktorem, který má výrazný vliv v rozmezí mezi první vstupní fází a na druhou stacionární fází je použití břitu s fazetkou a nebo bez ní. Hlavní roli hraje záporná geometrie řezného nástroje, která automaticky nastává v případě přítomnosti fazetky a to už ve vstupní fázi. U stejného řezného nástroje neopatřeného fazetkou lze pozorovat určitý časový posun některých řezných sil oproti ostatním. V případě použití fazety mají posuvové síly náchylnost k následování hlavní řezné síly.<sup>23</sup>



Obrázek 21 Obrázek s grafy zobrazující nárůst řezných sil v průběhu fáze záběru za stejných řezných podmínek (vlevo použit břit opatřen fazetou, vpravo bez fazety).<sup>23</sup>

Po srovnání obou variant z obrázku 21 je možno sledovat výhodnější zatížení za použití fazety v procesu druhé vstupní fáze oproti nového břitu bez fazety. Toto zvýhodnění u první fáze bohužel ovšem naopak vede k znevýhodnění zatížení po dobu druhé stacionární fáze. Hlavní příčinou je výška úrovně průměrné síly, která je v případě absence fazety na řezném nástroji nižší než u nástroje, jenž je fazetou opatřen. Následující efekt vyšší úrovně průměrné síly je příčinou vyššího stupně tepelného zatížení a tím také zvyšuje riziko dynamické nestability.<sup>23</sup>

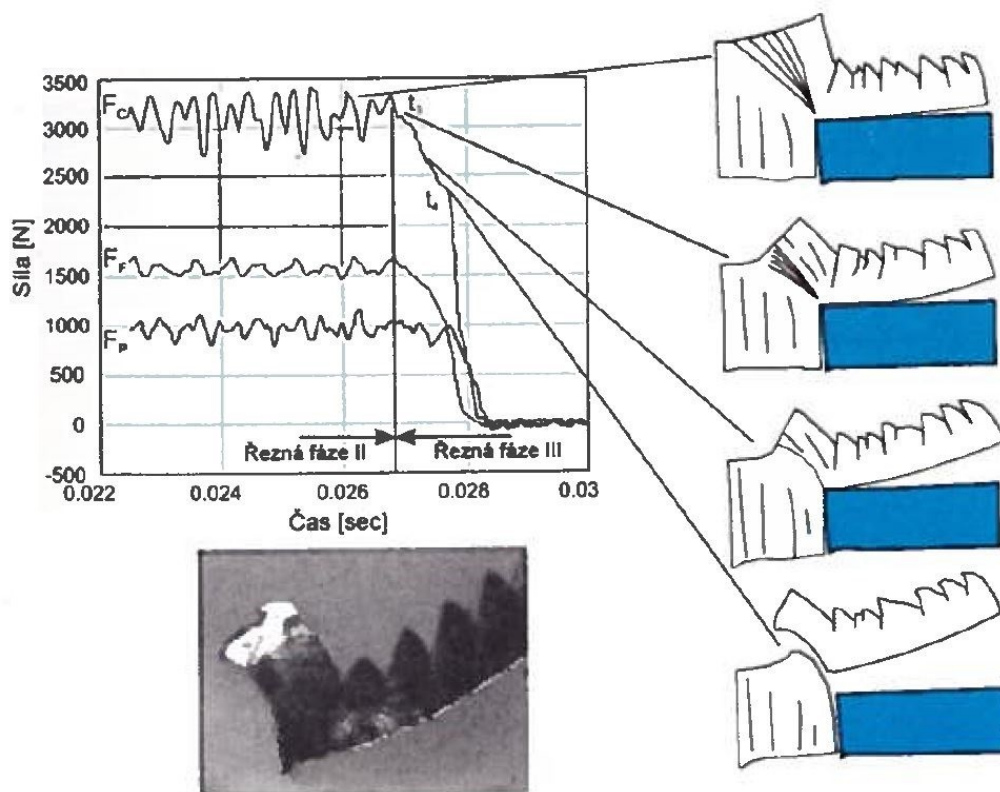
Řezný nástroj podléhá téměř úplné redukci zatížení na konci stacionární fáze, kdy proces vstupuje do třetí výstupní fáze, kterou je možno rozdělit do pěti po sobě následujících jednotlivých jevů:<sup>23 24</sup>

- Plastická deformace vnějšího povrchu materiálu obrobku vede k redukci jak hlavní řezné síly, tak posuvové síly,
- Počátek rozvoje negativní smykové roviny,
- Smykové napětí na čelní ploše mění směr,



- Na čelní plochu nepůsobí zatížení,
- Na hřbetní plochu nepůsobí zatížení.

Intervaly, v nichž se tyto dílčí jevy integrují, se odlišují, jak je možné vidět na následujícím obrázku.<sup>23</sup>



Obrázek 22 Dynamické rezné síly během prvních čtyř dílčích fází vstupní fáze v průběhu přerušovaného soustružení<sup>23</sup>

Na obrázku 22 je možno vidět průběh rezných sil po dobu třetí rezné fáze. Schémata na pravé straně obrázku zobrazují možnosti průběhu počátečních čtyř dílčích fází. Pro získání hodnot, které jsou použity v obrázku se při testech použil obrobek z velmi houževnatého materiálu. Nejlépe je možné třetí vstupní fázi popsat jako úbytek zatížení zobrazující se v protichůdném směru, než tomu je u vstupní fáze a jejího nárůstu zatížení. Počáteční parciální fáze třetí fáze se zahajuje při vstupu rezného nástroje do vnějšího povrchu obrobku, což zapříčiní jeho deformaci. V průběhu dalších dvou dílčích fází se tvoří záporná smyková rovina a vznik odštěpu třísky je v těsném sousedství se styčnou plochou obrobku, a to ve stejný čas jeho deformace. Během čtvrté dílčí fáze se postupně eliminuje kontakt čelní



plochy řezného nástroje a třísky, ale stále zde přetrvává kontakt mezi plochou hřbetu řezného nástroje a materiálem obrobku. Dále v poslední páté dílčí fázi už ani na hřbetní plochu není kladeno žádné zatížení jak v radiálním směru, tak i v axiálním směru. To má za následek zpětné elastické odpružení obrobku. Zřetelnou charakteristikou pro třetí výstupní fázi je tvar odváděné třísky ve tvaru boty, jak je možné vidět na obrázku 22 v jeho spodní části. Tříska může být od materiálu křehkou nebo tvárnou formou. Obě formy je možné vidět na obrázku 22. Křehké odlomení je typický pro obrábění křehkého materiálu, kterým může být třeba litina a je možné, že je způsobeno vedlejším nebo hlavním řezným břitem. Tato závada se pravidelně objevuje při obrábění šedé litiny v případě vyššího opotřebení hřbetu, což znamená, že VB je větší než 0,40 mm. Problému je ovšem možné předejít tím, že se zkosí hrany obráběné plochy. Tato operace je často využívána z důvodu zanedbatelného navýšení výrobních nákladů v porovnání se zkvalitněním stability řezného procesu a zvýšením životnosti řezného nástroje.<sup>23 24</sup>

Čtvrtou a poslední fází řezného procesu je fáze uvolnění, která může být také doprovázena určitým mechanickým zatížením. Toto mechanické zatížení je především projevem společným s ochlazením řezného nástroje po jeho vyjetí z obráběného materiálu.<sup>23</sup>

### 3 Metodika měření

Metodika měření využitelná v experimentální části diplomové práce je podrobněji popsána níže.

#### 3.1 Měření tvrdosti

Tvrdot a její hodnota patří mezi prioritní charakteristiky výsledného výrobku. Fyzikálně je tvrdost definována jako odpor testovaného materiálu vůči vniknutí jiného předmětu. Míra tvrdosti poskytuje údaj o odolnosti testovaného předmětu vůči opotřebení nebo také dává informaci o možnostech zpracovatelnosti daného materiálu.<sup>25</sup>

Členit metody měření je možné podle síly zatížení dynamické nebo statické. Dále je možné dělit metody na měření makrotvrdoti a mikrotvrdoti, přičemž měření makrotvrdoti se vyznačuje velikostí vrypu měřicího hrotu v řádech desetin až celých jednotek milimetru. Oproti tomu mikrotvrdot se zabývá pouze jednotlivými strukturními složkami o mimořádně malých površích materiálu. Díky širokému uplatnění v praxi je velmi rozšířená statická

vníkací metoda, kdy těleso, jenž je vtlačováno to měřeného povrchu má jasně specifikovaný tvar a samozřejmostí je jeho vyšší tvrdost oproti měřenému tělesu. Vtlačované těleso musí být přesně zatíženo předem nastavenou silou. Tvar a velikost vzniknutého vrypu v měřeném tělese se posléze změří a pomocí výpočtu lze vyvodit požadovanou hodnotu tvrdosti. Mezi málo rozšířené zkoušky tvrdost patří zkoušky odrazové, které jsou svou konstrukcí dynamického charakteru.<sup>25 26</sup>

Nejrozšířenějšími metodikami měření tvrdosti jsou statické metody podle Rockwella, Brinella a nebo Vickerse. Mezi ty méně využívané zkoušky patří například zkouška tvrdosti podle Knoop.<sup>26</sup>

### 3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Metoda, jejíž princip spočívá ve vtlačení diamantového, čtyřbokého jehlanu o pravidelných stranách do měřeného tělesa, přičemž úhel špičky jehlanu, tudíž úhel dvou protilehlých stran jehlanu svírá  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ . Tento jehlan je zatěžován jasně určenou silou po určitou dobu, a to ve směru kolmém vůči měřenému tělesu. Po vtlačení jehlanu je na pořadí změření úhlopříček čtverce, který vznikl po vniknutí jehlanu a odečtené hodnoty mohou být dosazeny do vzorce, který je uvedený níže.<sup>26</sup>

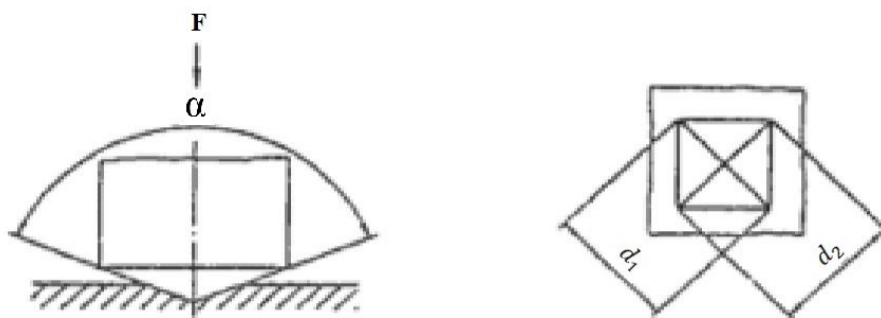
$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{d_1 \cdot d_2} \quad (3.1)$$

Velkou výhodou měření tvrdost podle Vickerse je až téměř nulové poškození měřeného tělesa, tudíž se měření dá využít i na dílcích z výroby bez obavy o jeho degradaci. Naopak možnou nevýhodou může být nutnost dobré kvality povrchu testovaného předmětu a také nevhodné použití u materiálů s heterogenní strukturou kvůli možnosti trefení se vpichem pomocí sondy do tvrdší fáze.<sup>26</sup>

Provedení měření tvrdosti podle Vickerse musí probíhat za splnění následujících kritérií:<sup>25 26</sup>

- Tloušťka zkoušeného materiálu musí být alespoň dvojnásobná oproti větší úhlopříčce vzniklého vpichu po indentoru
- Zkoušení musí probíhat za teplot  $10^\circ\text{C}$  až  $35^\circ\text{C}$
- Zkušební prostředí musí zaručovat eliminaci rázů nebo chvění z okolního prostředí

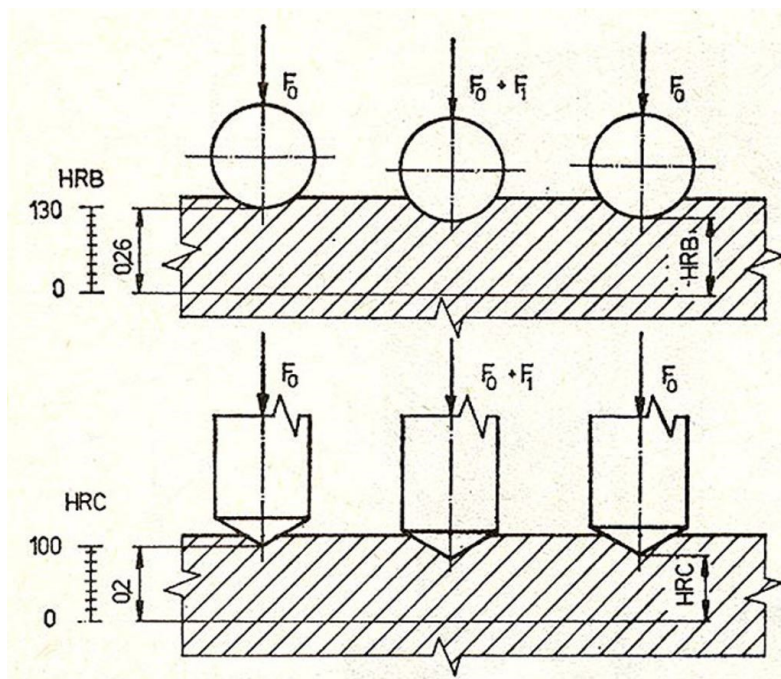
- Síly působící na testovaný materiál se musí pohybovat v rozmezí od 9,8 N do 980 N
- Při opakovaném měření stejné součásti je důležité dodržet vzdálenost mezi vpichy indentoru a to minimálně dvojnásobek délky delší úhlopříčky po vpichu.



Obrázek 23 Schéma metody měření tvrdosti podle Vickerse<sup>37</sup>

### 3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Metoda je pojmenována po svém vynálezci S. P. Rockwellovi. Jako vnikací těleso je možné zvolit diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ \pm 0,5^\circ$  nebo kuličku, která může mít průměr 1/16" nebo 1/8", přičemž každá z těchto variant má svoji vlastní stupnici. Stupnice jsou značeny písmeny A, B, C, E, F, G, H, K, N a T, přičemž mezi v praxi nejpoužívanější patří A, B a C. Zkouška A nebo C je provádí za pomoci diamantového kužele a zkouška B pomocí kuličky. Hodnotu tvrdosti je možné odečíst přímo ze stupnice měřicího zařízení. To dělá metodu velmi rychlou a snadnou.<sup>31</sup>

Obrázek 24 Schéma měření tvrdosti podle Rockwella<sup>27</sup>

Postup měření tvrdosti podle Rockwella je znázorněn na obrázku 24. První vtisk je způsoben předběžným zatížením  $F_0$ . V dalším kroku je vidět hloubku vtisku zapříčiněnou vlivem celkového zatížení, což je součet předběžného zatížení  $F_0$  a přídavného zatížení  $F_1$ . V třetím kroku je vidět pružnou, elastickou část hloubky vtisku způsobenou celkovým zatížením. Stejně tak čtverka značí trvalou, plastickou hloubku vtisku  $h$  po skončení působení přídavného zatížení. A nakonec číslo pět značí základní rovinu měření vzdálenou od povrchu o hloubku vtisku od předběžného zatížení.<sup>26</sup>

### 3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Je to vnikací zkouška, jejíž princip závisí na vtlačení indentoru do povrchu zkušebního materiálu. Vynálezcem této metody je Jonah August Brinell ze Švédska a oficiálně byla uvedena v roce 1900 v Paříži. V dnešní podobě zkouška spadá pod normu. Vnikací těleso je ve tvaru kuličky a to v průměrech  $D$  1; 2; 2,5; 5 a 10 mm. Pro méně tvrdé materiály se používá kulička s tvrdostí do 450 HB, která je zhotovena ze zakalené oceli a pro tvrdší materiály vyhovuje kulička ze slinutého karbidu s hraniční tvrdostí do 650 HB. Podle toho se rozděluje označení Brinellovy tvrdosti na HBS a HBW. HBS se udává při požití kalené ocelové kuličky a HBW se uvádí u měření za pomoci kuličky ze slinutého karbidu. Za naměřenou hodnotou tvrdosti se udává již zmíněné označení HBS nebo HBW a dále následuje index, který poukazuje na podmínky zkoušky. Jako příklad si uvedeme 210 HBW

2/600, kde 210 je hodnota tvrdosti, 2 je průměr vtiskávací kuličky v milimetrech a 600 značí zkušební zatížení 5 884,2 N.<sup>27</sup>

### 3.2 Měření řezných sil pomocí dynamometrů

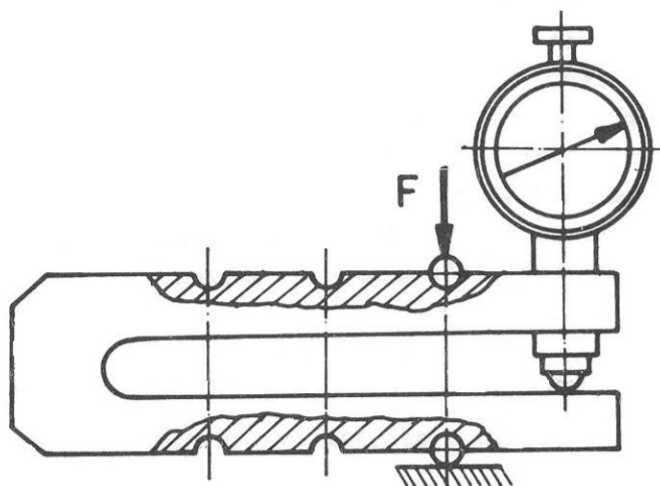
K získání přesných hodnot složek řezných sil v soustavě stroj-nástroj-obrobek je využíváno dynamometrů, které zaručují nezávislé měření veličin. Jejich konstrukce by měla zaručit vzájemnou neovlivnitelnost složek řezných sil. Zajištění dostatečné tuhosti měřidla v závislosti na zatěžující síle  $F$  je velmi důležitý parametr. Dynamometry je možné rozdělit z hlediska počtu měřených složek sil na jednosložkové, dvousložkové, třísložkové nebo také měření točivého momentu. Dále je možné je rozdělit podle používané metody měření, konkrétně na dynamometry hydraulické, pneumatické, elektrické, mechanické nebo optické. A také je důležité dynamometry rozdělovat podle typu obrábění, u kterého jsou použity, a to při frézování, soustružení, broušení nebo vrtání, přičemž jsou k dispozici i dynamometry univerzální.<sup>28</sup>

#### 3.2.1 Mechanické dynamometry

Je to nejpoužívanější typ dynamometru, u kterého se síla přenáší přímo na měřící čidlo nebo pomocí mechanického převodu, kdy je síla zvětšena. Používá se také pro cejchování ostatních typu dynamometrů z důvodu eliminace rušivých vlivů při procesu díky jeho konstrukci. Odečítaná síla působí a deformuje nejčastěji silové pružiny, třmeny, nosníky, nebo také definovanou kuličku, která je vtlačována do zvoleného materiálu o definované tvrdosti.<sup>28</sup>

Nejznámějším přístrojem v této kategorii dynamometrů je dynamometr třmenový, který je schopný unést zatížení až do 10 000 N. Dalšími typy mechanických dynamometrů jsou prstencové nebo kruhové, které je možné zpravidla zatížit ještě vyšší silou než dynamometry třmenové.<sup>28</sup>

Pro mechanické dynamometry je typická jejich spolehlivost a přesnost, která dosahuje hodnot v rozpětí od 0,5 % do 2 %. Naopak mezi nedostatky mechanických dynamometrů patří vůle v mechanismech a jejich potřeba kontroly vymezování. Dále nutnost měření za konstantních teplot z důvodu udržení přesnosti a stálosti měření.<sup>28</sup>

Obrázek 25 Schéma třmenového mechanického dynamometru<sup>29</sup>

### 3.2.2 Hydraulické a pneumatické dynamometry

Princip tohoto druhu zařízení spočívá v přenosu měřených sil na píst (membránu) hydraulického obvodu. Následný pohyb pístu způsobí změnu tlaku v hydraulickém obvodu a tato změna je zaznamenávána například pomocí manometru. Přednostmi hydraulických dynamometrů je jednoduchost jejich konstrukce a schopnost zaznamenávání několika složek najednou. Mezi nedostatky patří nízká míra citlivosti a vysoká setrvačnost systému a také vysoké požadavky na jeho těsnost.<sup>28</sup>

U pneumatických dynamometrů se jejich princip fungování zakládá na deformaci pneumatického systému tryska-klapka. Využívají se zde dynamické vlastnosti vzduchu, který prochází štěrbinou. Dochází k měření tlakových nebo průtokových výkyvů v závislosti na změně průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu. Jako hlavní výhody pneumatických dynamometrů jsou brány především výborná citlivost a spolehlivost systému oproti například elektrickým dynamometrům a finančně nenákladný provoz a pořizovací cena.<sup>28</sup>

### 3.2.3 Dynamometry elektrické

Elektrické dynamometry patří mezi nejvyužívanější a nejrozšířenější měřidla tohoto typu vůbec například kvůli možnosti detekování signálu při měření rotujících součástí. Dále kvůli snadné dostupnosti napájecích zdrojů a čistotě provozu nebo možnosti využití velmi malých měřících elementů.<sup>28 30</sup>

Základní rozdělení podle elektro-mechanické transformace je možné řadit do dvou systémů. První je systém parametrický, který je založen na zaměnění jednoho parametru elektrického obvodu, mezi které patří indukčnost (L), kapacita (C) a odpor (R). Druhým systémem je generátorový systém fungující na principu tvorby napětí nebo proudu v průběhu deformace elementů, přičemž je možné využití piezoelektrického jevu.<sup>33</sup>



Obrázek 26 Statický nástrojový dynamometr Kistler<sup>34</sup>

Mezi základní typy elektrických dynamometrů patří:<sup>33</sup>

a) Indukční elektrické dynamometry

Tento typ dynamometru využívá působení síly, která namáhá pružný člen dynamometru, který se následně deformuje a za pomoci této deformace se vychyluje poloha jádra v indukční cívce a to má za následek změnu indukčnosti, která zobrazuje velikost silového zatížení.<sup>33</sup>

b) Kapacitní elektrické dynamometry

Obdobně jako u indukčních elektrických dynamometrů i zde u kapacitních elektrických dynamometrů je využíváno elektro-mechanické transformace. Zde se měří působení síly

podle výchyly kapacity snímače v závislosti na velikosti deformace. Použité senzory tvoří paralelní desky, které jsou vymezeny dielektrikem a jsou situovány naproti sobě. Tento útvar tvoří kondenzátor, který je napojený na pružný element. Deskový kondenzátor je možné považovat za základní kapacitní snímač, u kterého je možné kapacitu vypočítat z následujícího vztahu.<sup>28 30</sup>

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{a} [F] \quad (3.2)$$

Jako benefit měření pomocí tohoto druhu měřidla je dosažení vysoké citlivosti při měření a poměrně nízká hmotnost zařízení a jako slabá stránka se naopak jeví vysoká citlivost vůči vnějším vlivům.<sup>28</sup>

### c) Odporové elektrické dynamometry

Tento typ elektrického dynamometru je používán při získání hodnot deformace, od které se odvíjí odpor snímače. Mezi nejpřesnější a zároveň nejpoužívanější snímače patří tenzometrický odporový dynamometr. Jeho fungování spočívá na zjištění rozdílu ohmického odporu v návaznosti na pružné deformaci tenzometrického vlákna, které je zpravidla kovové. Nejvyužívanější slitina vytvářející odpor u kovového tenzometru se nazývá konstantan (Cu-Ni), jejíž součinitel deformační citlivosti je  $k=2$  a zároveň má značný měrný odpor. Deformaci je zatížen jak odporový tenzometr, tak i jeho deformační člen, protože jsou spojeny pevnou vazbou. Následující vztah demonstruje princip měření, který odporové elektrické dynamometry využívají.<sup>30</sup>

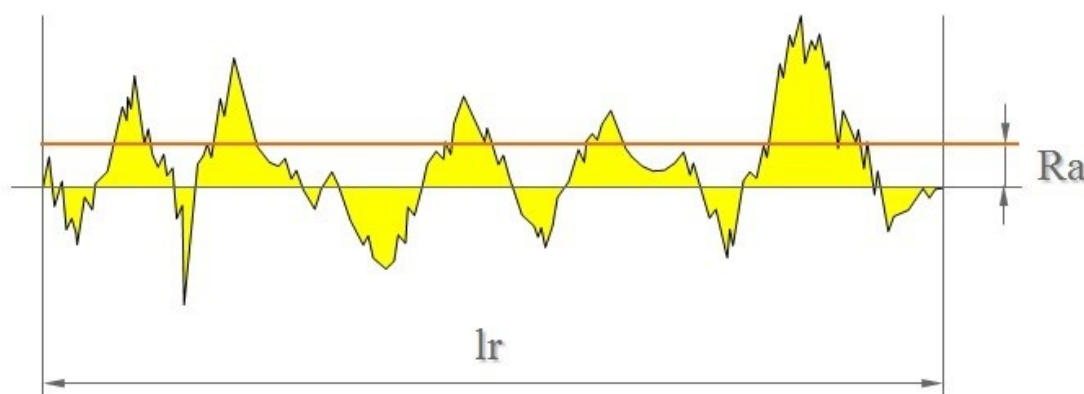
$$P = \rho \cdot \frac{1}{S} [\Omega] \quad (3.3)$$

## 3.3 Měření drsnosti povrchu obrobené plochy

Definici drsnosti povrchu je možné formulovat jako seskupení nerovností na exponovaném povrchu součástí, které jsou důsledkem některé z výrobních metod. Po obrobení plochy za sebou nástroj zanechává stopy a ty spolu s dalšími nerovnostmi tvoří výslednou drsnost povrchu.<sup>31</sup>

Mezi hlavní parametry určující drsnost povrchu spadá průměrná aritmetická úchylna profilu značená  $R_a$ . Je to aritmetický průměr všech absolutních hodnot v rozsahu délky  $l_r$ , přičemž jeho vypovídající schopnost je nízká z důvodu nepřesné detekce extrémních výšek a rýh měřeného profilu.<sup>31</sup>



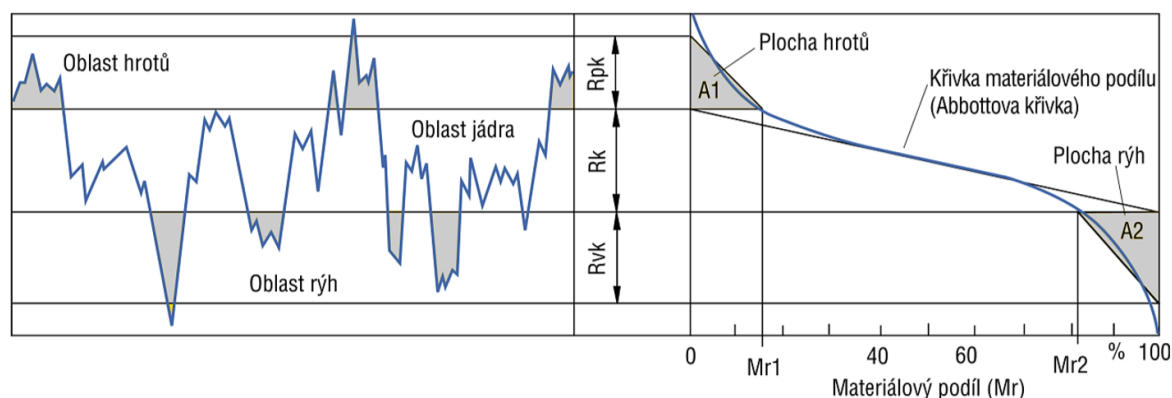
Obrázek 27 Průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$ <sup>32</sup>

Střední hloubka profilu je také jedním z důležitých parametrů udávající aritmetický průměr pěti po sobě jdoucích hloubek drsnosti, přičemž měřené plochy na vzorku spolu musí sousedit. U neperiodických povrchů je podstatná přímá závislost na hodnotě  $R_a$  a tu je potřeba před měřením určit. Délky pro výpočet průměrné aritmetické úchylky a křivek neperiodických povrchů jsou uvedeny v tabulce 1.<sup>31</sup>

Tabulka 1 Základní délky drsnosti pro neperiodické povrchy<sup>35</sup>

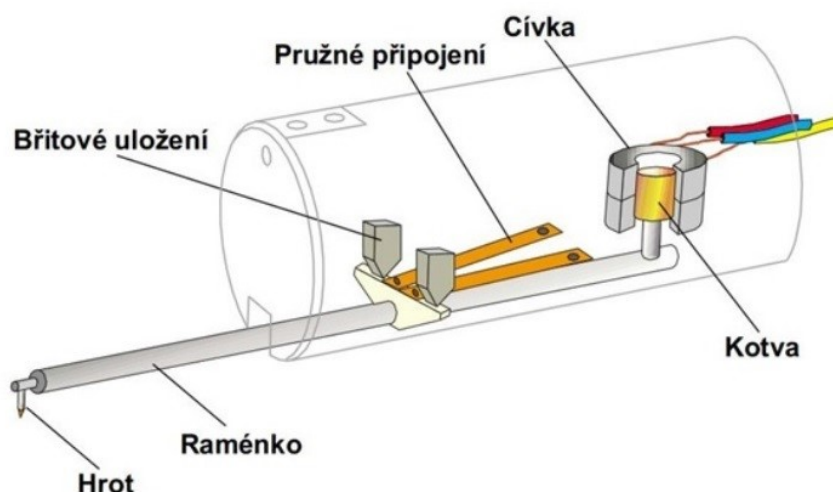
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Základní délka $l_r$ [mm]	Vyhodnocení délky $l_n$ [mm]
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Pro dané dokončovací metody je charakteristická křivka materiálového podílu, která je důležitá z hlediska tření, únosnosti, opotřebení a celkového zhodnocení účelu opracovaného povrchu v tribologii. Křivka materiálového podílu prozrazuje stoupání nosné délky povrchu ve směru do obrobku. Jinými slovy ukazuje poměr volného prostoru v materiálu napříč celou plochou. Zakresluje se jako funkce výšky všech řezů materiálu od nejvyšších hodnot. Celková výška křivky se skládá ze tří částí. První se značí  $R_{pk}$  a slouží k určení části plochy, která má tendenci se rychleji opotřebovat. Prostřední část je jádro profilu a značí se  $R_k$ . A nakonec spodní část  $R_{vk}$ , která určuje velikost a množství prohlubní v povrchu.<sup>31</sup>

Obrázek 28 Parametry nosné křivky<sup>33</sup>

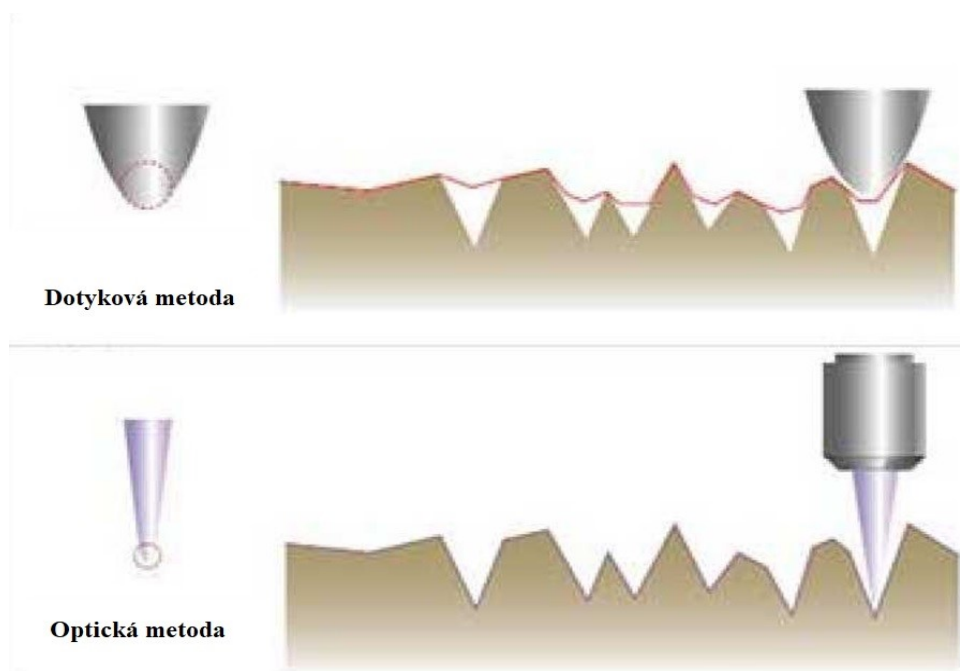
### 3.3.1 Dotyková metoda měření drsnosti

Princip dotykové metody měření drsnosti spočívá ve snímání měřené části plochy dílce za pomoci hrotu o definovaných rozměrech. Kolísání pohybu hrotu ve výškové ose se sleduje za účelem zjištění velikosti nerovností. Zařízení, které se nejčastěji používá k tomuto typu měření se nazývá dotykový profilometr. Tohle zařízení se skládá z mechanismu hrotu, tudíž z mechanické části a části elektrické, jenž je určená, aby transformovala mechanický signál. Na mechanickou část zakončenou hrotem působí konstantní přitlačná síla o velikosti  $F = 0,00075 \text{ N}$  k zajištění stálého dotyku mezi hrotem dotykového profilometru a měřenou součástí při jeho pohybu. V závislosti na typu použitého profilometru jsou výškové rozdíly měřeného povrchu zaznamenávány buďto jako profilografy nebo jako výkyvy indukčnosti a napětí pomocí analogového převodu. Díky tomu, že hrot profilometru dokáže před sebou odtrhovat nebo prorážet nežádoucí částice, které mohou znečišťovat měřicí plochu včetně olejů a jiných provozních kapalin, je tato metoda výhodnější oproti optickým metodám vzhledem k nižší nutnosti čistoty pracovního prostředí. Nejvhodnější tvar hrotu profilometru je kužel, jehož špička může mít průměr  $2 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$  a nebo  $10 \mu\text{m}$ , přičemž hodnoty vrcholového úhlu kužele jsou  $60^\circ$  nebo  $90^\circ$ . Jako materiál pro výrobu hrotu se zpravidla používá diamant nebo safír.<sup>31</sup>

Obrázek 29 Zobrazení dotykového profilometru<sup>34</sup>

### 3.3.2 Bezdotyková metoda měření drsnosti

Bezdotyková metoda a její hlavní výhoda spočívá v tom, že při měření drsnosti povrchu nepřichází měřící zařízení nijak do styku s měřenou součástí. Z toho plyne nemožnost jakéhokoli poškození součásti. Její princip spočívá v promítání paprsku světla na povrch měřené součásti, který se od něj následně odrazí do detektoru nebo rozptýlí. Touto metodou je také možné měřit značně větší plochy bez potřeby korekce hrotu jako tomu je u klasických profilometrů. Další velkou výhodou je vysoká citlivost těchto optických přístrojů. Toho je využíváno například při měření povrchů s velmi jemnými nepravidelnostmi, jaké jsou třeba tvořeny žárovým nanášením materiálu. Hrot konvenčního profilometru se nemůže dostat do menší mezery než  $2\text{ }\mu\text{m}$ , což vede k nižší objektivitě měření, což neplatí pro bezdotykovou metodu, která je výrazně přesnější.<sup>35</sup>

Obrázek 30 Porovnání dotykové metody a metody optické<sup>36</sup>

## 4 Experimentální část

### 4.1 Návrh Experimentu

Pro experiment jsou vybrány nástřiky nanesené pomocí zařízení ARC spray, jehož zařízení je na obrázku 31. Tyto nástřiky budou naneseny na dva typy vzorků. Prvním z nich je mezikruží, které je určeno pro simulaci přerušovaného řezu pomocí vytvořených drážek na vnitřním průměru, kde bude nanesen termální nástřík. Na mezikruží se bude měřit velikost řezných sil při jejich soustružení a dále proběhne vizuální kontrola drážky a její porovnání v závislosti na zvolených řezných podmínkách. Druhým typem vzorku budou válečky, na které se nanese stejný druh termálních nástřiků, přičemž se obrobí za stejných řezných podmínek jako zmíněná mezikruží. Na válečkách se bude měřit výsledné zpevnění povrchové vrstvy materiálu pomocí tvrdoměru a také drsnost, která je pro funkčnost plochy v reálných aplikacích stěžejní. Výsledkem experimentu by mělo být doporučení nejvhodnějších řezných podmínek pro soustružení vybraných termálních nástřiků.



Obrázek 31 Pracovní kabina technologie ARC spray

## 4.2 Použitá zařízení, příprava vzorků a jejich obrobení

### Použité materiály

Pro experiment byly použity dva typy nástřiku, které se dělají technologií ARC spray. O té je možno se dočíst v kapitole 1.3.4.. Byly vybrány dva odlišné materiály od firmy Praxair, které se do zařízení podávají ve formě drátu o průměru 1,6 mm. První měkkí na bázi hliníku a druhý na bázi niklové. Ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc se oba dva materiály používají především při opravách vzniklých neshod. Jejich přesnější materiálové složení je níže v tabulce č. .

Tabulka 2 Chemické složení materiálu Praxair TAFA 01S

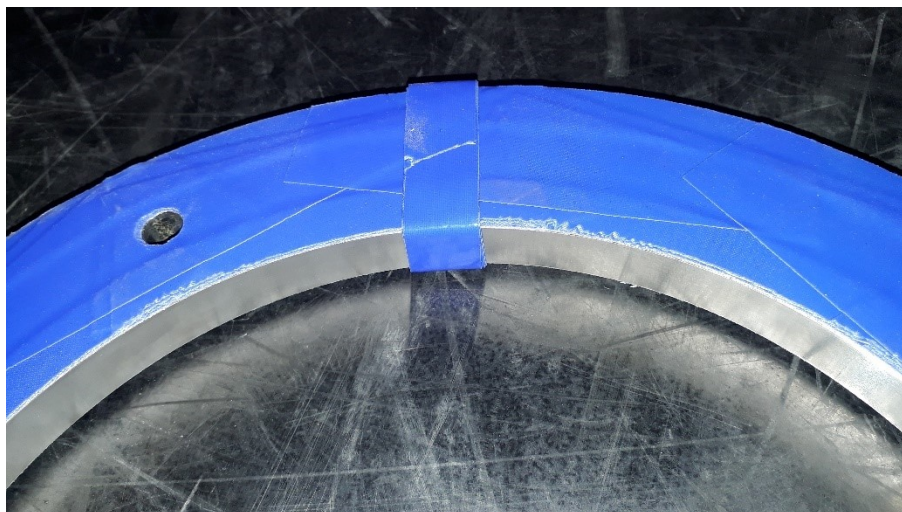
Chemické složení	Obsah [%]
Hliník	>75
Silikon	5 – 20

Tabulka 3 Chemické složení materiálu Praxair TAFA 75B

Chemické složení	Obsah [%]
Nikl	>75
Hliník	1 – 5
Chrom	<1
Kobalt	<1

### Příprava vzorků

Pro simulaci přerušovaného řezu se vybrala mezikruží o vnitřním průměru 260 mm a pro měření drsnosti povrchu po obrobení a vyhodnocení tvrdosti se použily válečky o průměru 25 mm, přičemž na obou typech vzorků se nanáší nástřik o tloušťce 3 mm. Prvotní příprava spočívá v odmaštění všech ploch vzorku. V našem případě bylo vhodné použít aceton, protože vzorky nebyly nijak výrazně znečištěné a pomocí čistého, suchého hadru se vyčistily všechny plochy. Dále bylo nutné zamaskovat plochy vzorků, na které nebyl požadavek nanesení žárového nástřiku. Pomocí maskování byly u mezikruží vytvořeny drážky široké 20 mm pro simulaci přerušovaného řezu. Aplikaci maskovací pásky pro vytvoření drážky je možné vidět na obrázku 32. Maskovací páska na dílci zůstává jak po dobu tryskání, tak i po dobu nanášení žárového nástřiku. Díky tomu musí být páska navržena tak, aby odolala tryskacímu účinku i teplotám do 400 °C.



Obrázek 32 Ukázka maskování mezikruží pro simulaci přerušovaného řezu

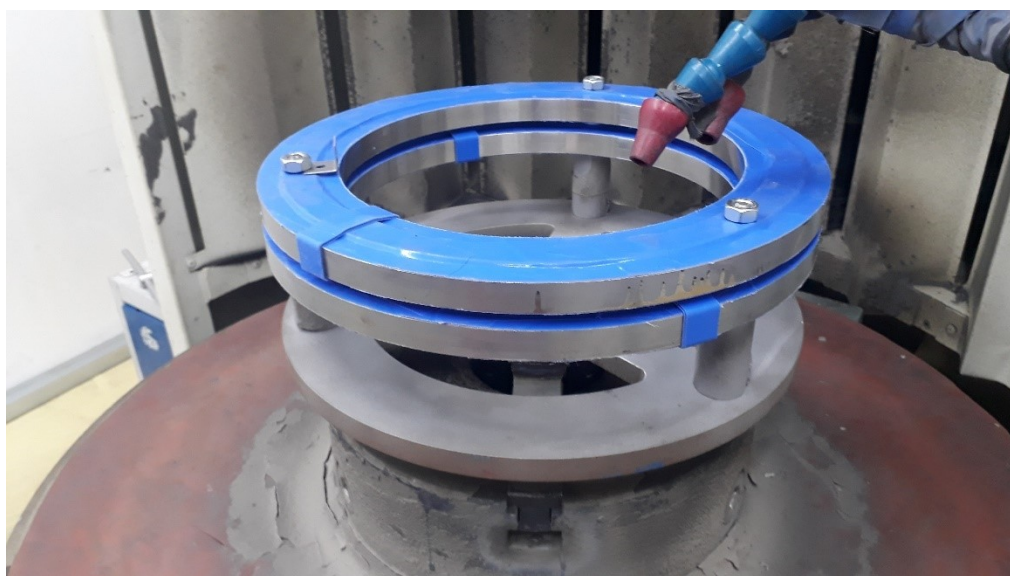
V dalším kroku přichází na řadu tryskání, které probíhá v tryskacích kabinách, jež jsou vidět na obrázku 33. Tryskací plochy, na které bude posléze nanášen nástřik je nezbytné z důvodu odstranění zbytkových nečistot a především k celistvému zdrsnění povrchu, což je důležité pro dostatečně pevné přilnutí nanášeného materiálu k substrátu. Jako tryskací médium je použit hnědý korund o frakci F36.



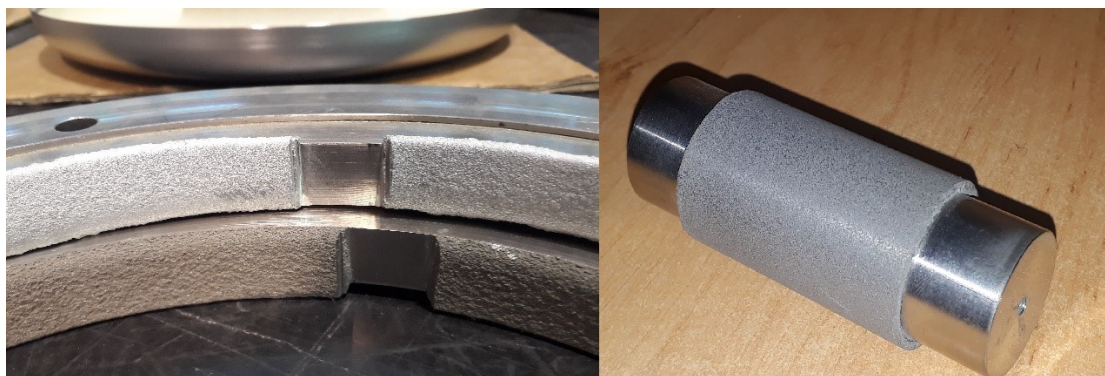


Obrázek 33 Tryskací zařízení pro úpravu povrchu před nanášením termálního nástřiku

Po řádné úpravě ploch se pokračuje s nanášením nástřiku na mezikruží a válečky o tloušťce 3 mm. Při procesu bylo nutné použít speciální přípravky, které jsou na obrázku 34. Finální podoba odmaskovaných vzorků připravených pro testy obrábění je na obrázku 35.



Obrázek 34 Ukázka průběhu nanášení termálního nástřiku












Obrázek 35 Vzorky připravené na testy obrábění

### Použité řezné parametry a břitové destičky

Pro obrábění obou typů vzorků je použita technologie soustružení. Využito je vyměnitelných břitových destiček od firmy Garant, jejichž specifikace je uvedena níže. Pro soustružení žárových nástřiků je ze zkušenosti z praxe nejvhodnější využít břitové destičky s pozitivní geometrií. Konkrétně byly využity destičky s označením DCMT 11T308 a DCMT 11T302 s úhlem hřbetu  $7^\circ$ , které se liší rádiusem řezné špičky. V našem případě se jedná o hodnoty 0,8 mm a 0,2 mm.

Tabulka 4 Technické údaje pro destičky DCMT 11T308 a DCMT 11T302

Počet výměn	2
Doporučená řezná rychlost $v_c$	120 – 150 m/min
Doporučený posuv $f$	0,2 – 0,9 mm/ot
Doporučená hloubka řezu $a_p$	0,15 – 1,5 mm
Druh	HB7035-1
Přířazení	Dokončování

 < 500 N	 < 750 N	 < 900 N	 < 1100 N	 < 1400 N				
☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑

Obrázek 36 Aplikační tabulka pro použité břitové destičky<sup>41</sup>

Při volbě řezných podmínek se zaměřujeme především na řeznou rychlost  $v_c$ , posuv  $f$  a hloubku úběru třísky apod. Při jejich určení se vychází z hodnot parametrů používaných pro obrábění žárových nástřiků ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc.



Tabulka 6 Navržené řezné parametry

Řezná rychlost $v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Posuv $f$ [mm]	Hloubka řezu [mm]
150	0,3	0,2
150	0,9	0,2
250	0,3	0,2
250	0,9	0,2
350	0,3	0,2
350	0,9	0,2

### Přístroj pro měření tvrdosti

Tvrdot obrobeneho nástřiku byla měřena ve společnosti Honeywell na přístroji dostupném v místní laboratoři. Konkrétně na přístroji Leco LR-300TDL podle normy, která je využívána v provozu společnosti v rámci žárových nástřiků. Indentor použitého přístroje disponuje vnikací kuličkou o průměru 12,7 mm, tudíž využívající metoda měření je podle Rockwella s přesným označením HR15Y.



Obrázek 37 Zařízení pro měření tvrdosti

### Použitý obráběcí stroj

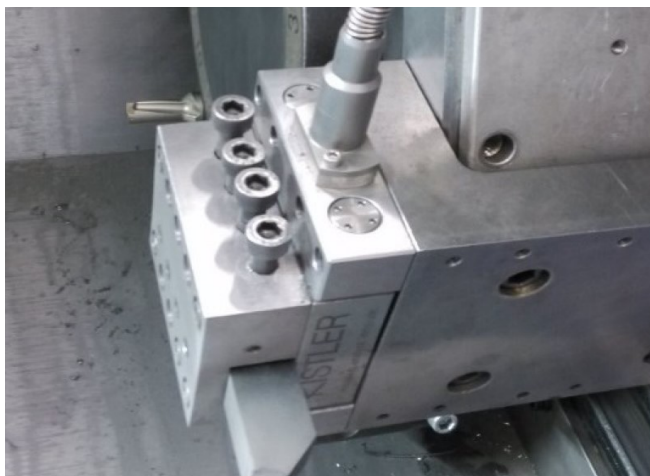
Obrábění vzorků pro zjištění řezných sil při obrábění byl použit soustruh CNC NLX 2500/700, který je vyhovující pro všechny požadavky testování jako je vysoká přesnost a vysoká tuhost.



Obrázek 38 Použitý CNC soustruh

### Použitý dynamometr

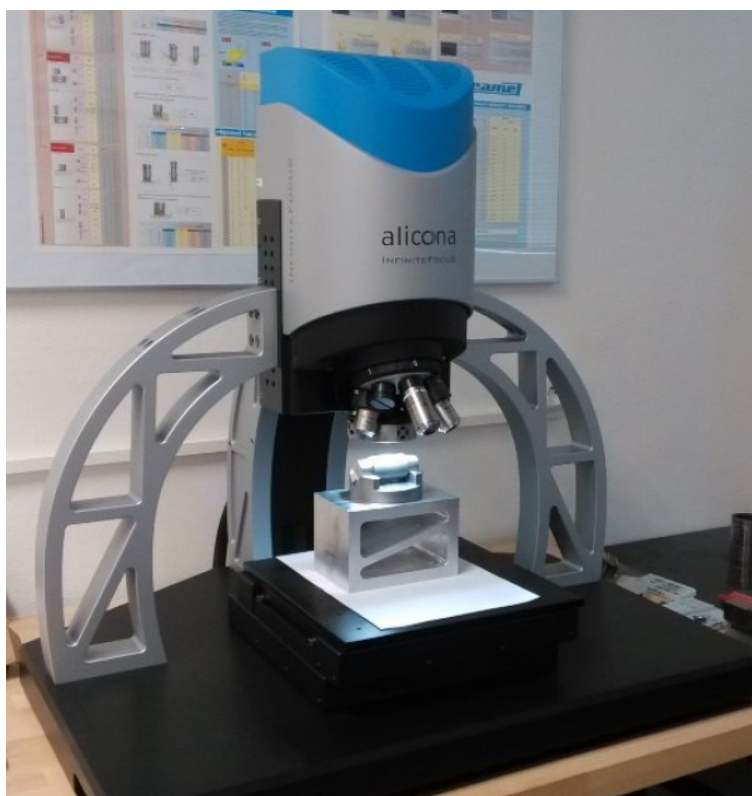
Při testování byl použit třísloužkový dynamometr Kistler 9129AA a k němu byl využit zesilovač Kistler 5070. Plášť dynamometru má velmi vysokou tuhost s nímž je spojen držák nože pro obrábění, který je uložen na několika snímacích člancích osazených deformačními tělesy.



Obrázek 39 Použitý dynamometr

### Použitý přístroj pro měření drsnosti

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno 3D optickým mikroskopem Alicona InfiniteFocus, který dokáže zmapovat topografii povrchu. Funguje na principu bezkontaktní, optické metody založené na změně zaostření. Zařízení je určeno pro kontrolu malých součástí a mikrostruktury povrchu. Výhodou je rychle vyhodnocení profilové i plošné drsnosti měřeného povrchu součásti.



Obrázek 40 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus

### **4.3 Souhrn naměřených hodnot**

Experimentálním zjištěním složek řezných sil v průběhu obrábění bylo možné vypočítat výslednou řeznou sílu  $F$  pro jednotlivé zvolené parametry obrábění. Pro zpracování a vypočtení řezných sil byly využity vztahy uvedené níže.

Výběrový průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Výběrová směrodatná odchylka:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru:

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

Rozšířená nejistota:

$$U = k_U \cdot u_A \quad (4.4)$$

Koeficient rozšíření, který byl využit činí  $k_U = 2$  a pravděpodobnost pokrytí  $p = 95\%$ .

Celková směrodatná odchylka u celkové řezné síly se vypočítala následovně:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} = (\bar{F} \pm U) \quad (4.5)$$

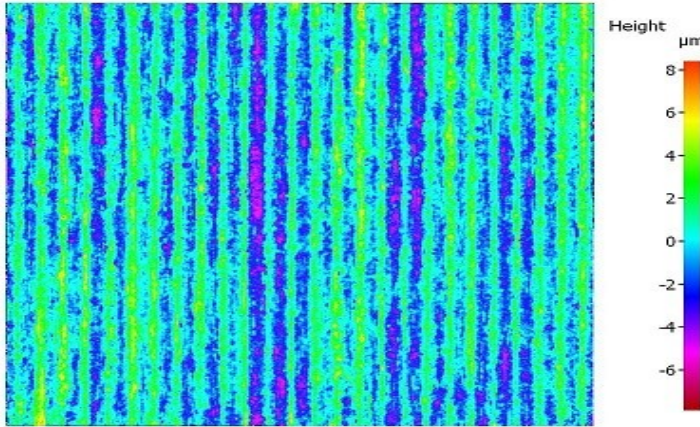
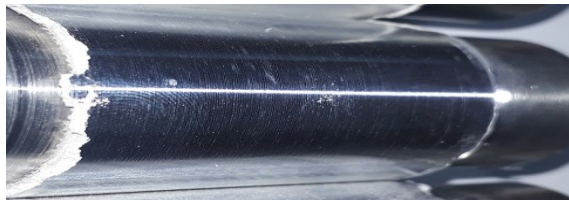
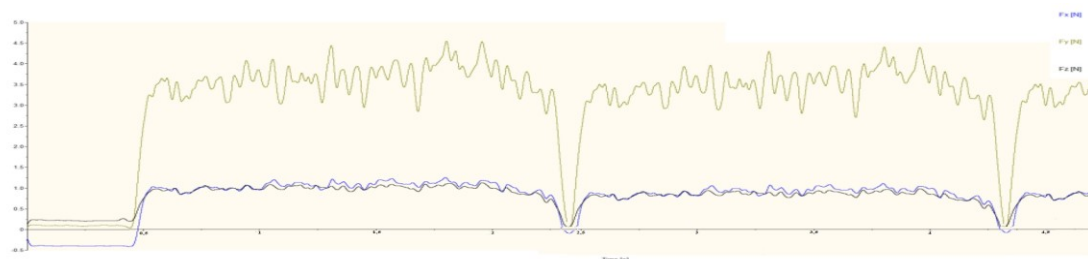
$$\frac{\partial F}{\partial F_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_c = \frac{F_c}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_c}{F} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_f = \frac{F_f}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_f}{F} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_p = \frac{F_p}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_p}{F} \quad (4.8)$$

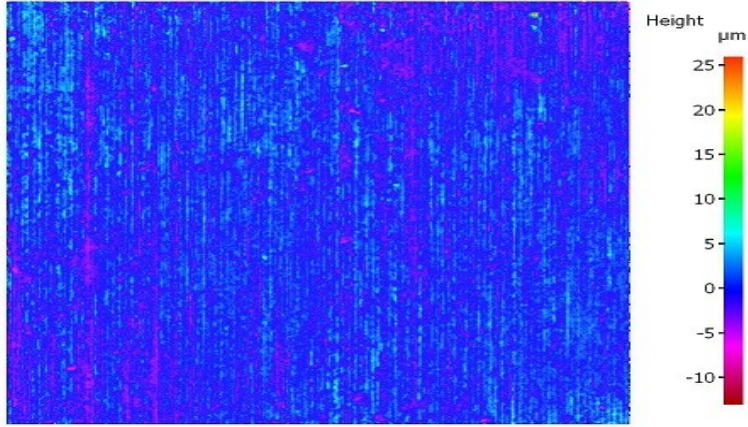

$$S_{(F)} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial F_c} \cdot S_{(F_c)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_f} \cdot S_{(F_f)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_p} \cdot S_{(F_p)}\right)^2} \quad (4.9)$$

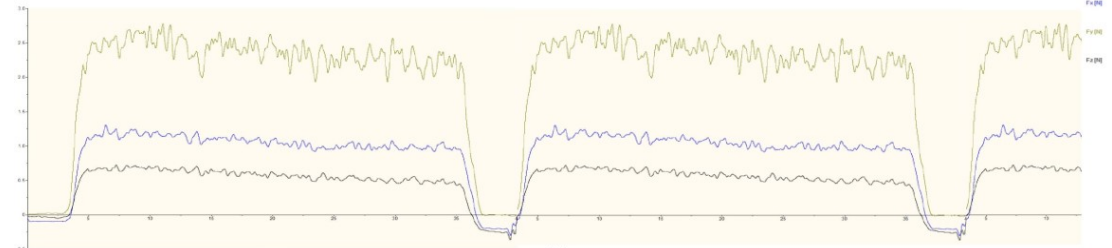
Tabulka 7 Průběh měření vzorku č.1

Druh břitové destičky/Mat.											
DCMT 11T302/Al											
Podmínky obrábění											
Řezná rychlost	150 m min <sup>-1</sup>										
Posuv	0,3 mm										
Hloubka řezu	0,20 mm										
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=7,56μm										
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=7,91μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]				Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =4,54		F <sub>c</sub> =4,65				F <sub>c</sub> =4,81			
		F <sub>f</sub> =0,64		F <sub>f</sub> =0,71				F <sub>f</sub> =0,79			
Celková hloubka profilu	Rz=57,11μm	F <sub>p</sub> =5,56		F <sub>p</sub> =5,85				F <sub>p</sub> =6,03			
		F <sub>c</sub>	̄F=4,66	Σ=486	s(F)=0,13	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016				
			F <sub>c</sub> =(4,66±0,016) N								
		F <sub>f</sub>	̄F=0,73	Σ=156	s(F)=0,04	u <sub>a</sub> =0,002	U=0,004				
			F <sub>f</sub> =(0,73±0,004) N								
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	̄F=5,83	Σ=720	s(F)=0,16	u <sub>a</sub> =0,009	U=0,018				
			F <sub>p</sub> =(5,83±0,018) N								
		F=(4,77±0,028) N									
		Výsledky měření tvrdosti									
Před obrobením											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
41,9			41,5			47,7			46,4		
Po obrobení											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
49,2			47,8			52,8			51,7		
Poznámky k přerušovanému řezu											
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.											
											

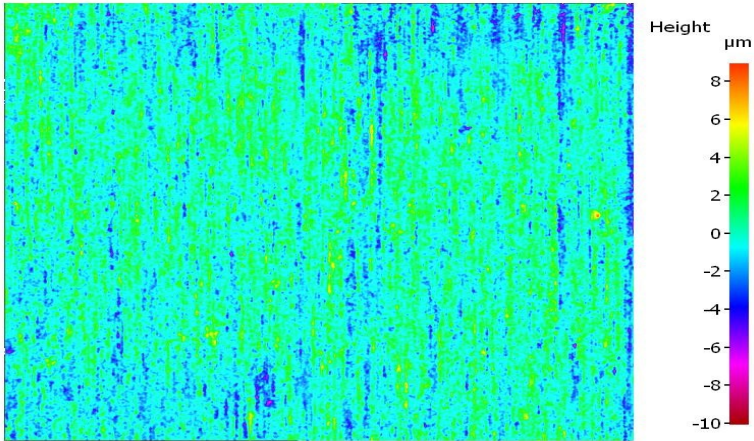
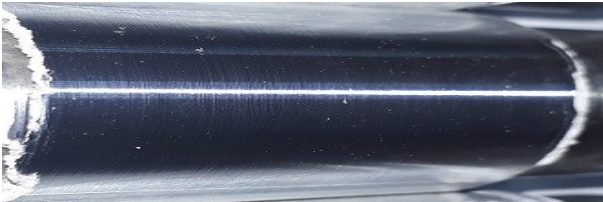
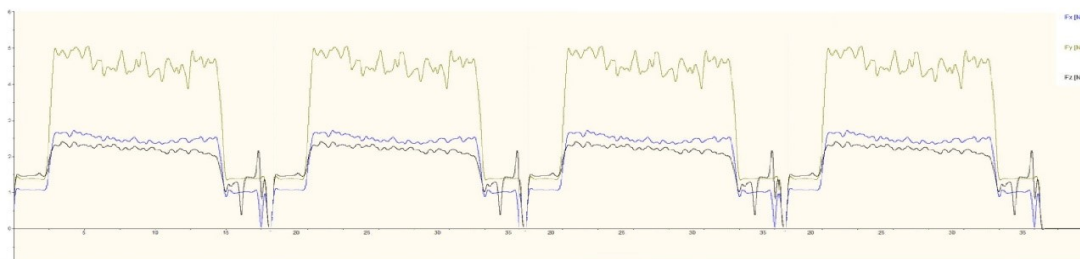


Tabulka 8 Průběh měření vzorku č.2

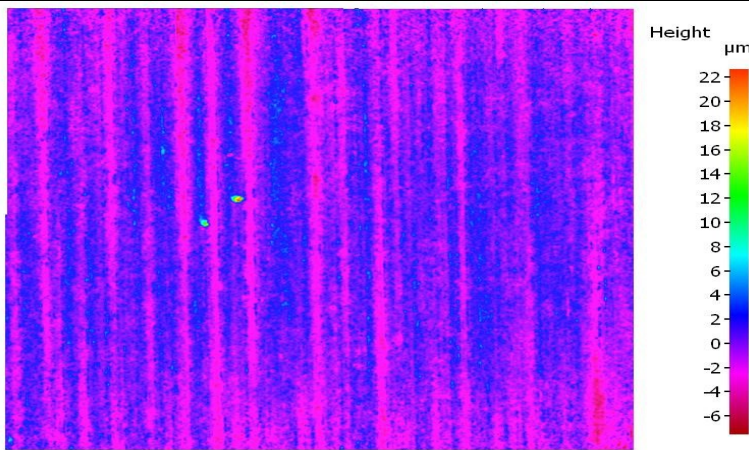

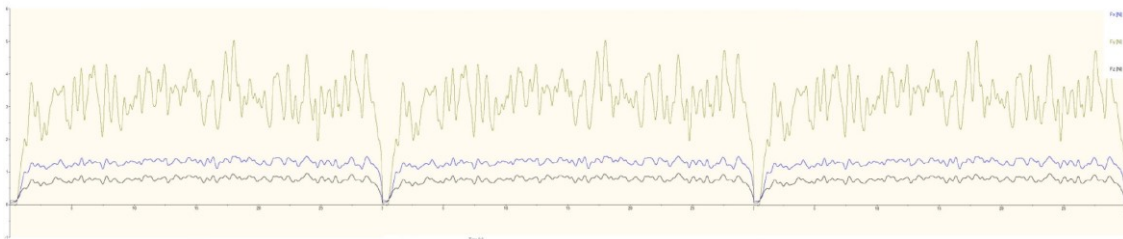
Druh břitové destičky/Mat.								
DCMT 11T302/Ni								
Podmínky obrábění								
Řezná rychlost	150 m·min <sup>-1</sup>							
Posuv	0,3 mm							
Hloubka řezu	0,20 mm							
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=7,56μm							
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=8,52μm	Minimální hodnoty [N]	Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =5,02	F <sub>c</sub> =5,42		F <sub>c</sub> =5,81			
		F <sub>f</sub> =0,76	F <sub>f</sub> =0,82		F <sub>f</sub> =0,88			
Celková hloubka profilu	Rz=51,21μm	F <sub>p</sub> =4,12	F <sub>p</sub> =4,20		F <sub>p</sub> =4,28			
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=5,43$	$\Sigma=912$	$s(F)=0,19$	$u_a=0,010$	$U=0,020$	
			F <sub>c</sub> =(5,43±0,020) N					
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,81$	$\Sigma=240$	$s(F)=0,07$	$u_a=0,003$	$U=0,006$	
			F <sub>f</sub> =(0,81±0,006) N					
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=4,19$	$\Sigma=830$	$s(F)=0,18$	$u_a=0,008$	$U=0,016$	
			F <sub>p</sub> =(4,19±0,016) N					
		F=(5,32±0,022) N						
		Výsledky měření tvrdosti						
Před obrobením								
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y		
58,4		58,2		59,4		57,9		
Po obrobení								
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y		
65,4		63,2		64,2		66,7		
Poznámky k přerušovanému řezu								
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.								


--

Tabulka 9 Průběh měření vzorku č.3

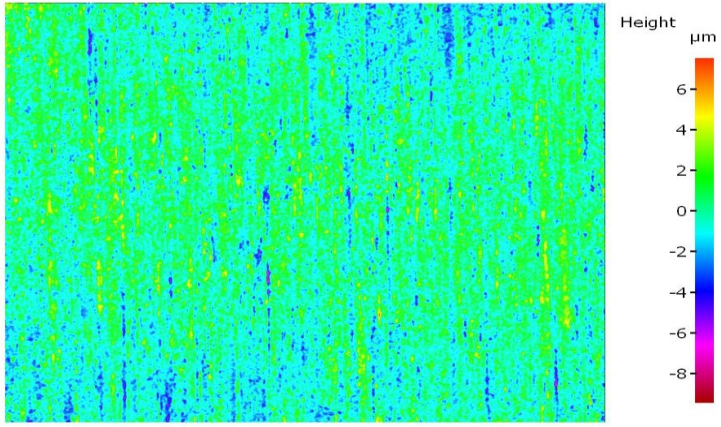
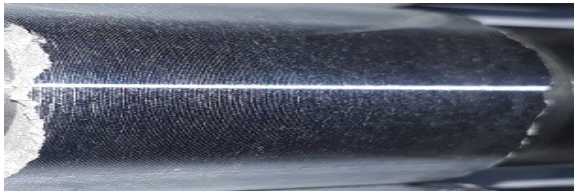
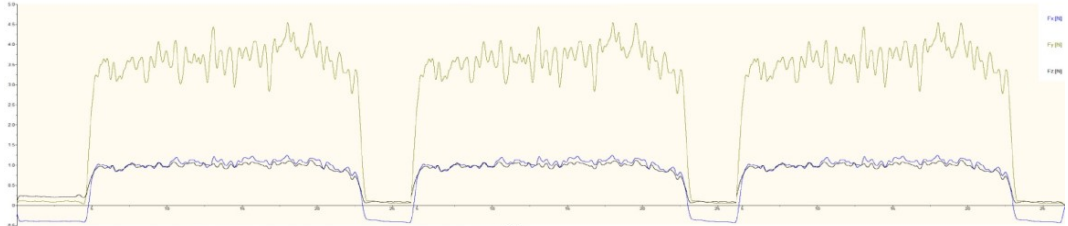
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	150 m min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=8,56μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=10,58μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,53		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,72	
		F <sub>f</sub> =0,69		F <sub>f</sub> =0,78		F <sub>f</sub> =0,86	
Celková hloubka profilu	Rz=57,21μm	F <sub>p</sub> =5,78		F <sub>p</sub> =5,92		F <sub>p</sub> =6,09	
		F <sub>c</sub>	̄F=5,62	Σ=511	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,005	U=0,010
			F <sub>c</sub> =(5,62±0,010) N				
		F <sub>f</sub>	̄F=0,78	Σ=287	s(F)=0,01	u <sub>a</sub> =0,001	U=0,002
F <sub>f</sub> =(0,78±0,002) N							
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	̄F=5,93	Σ=831	s(F)=0,07	u <sub>a</sub> =0,006	U=0,012
			F <sub>p</sub> =(5,93±0,012) N				
		F=(5,23±0,026) N					
		Výsledky měření tvrdosti					
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
45,5		46,8		44,1		45,5	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
52,3		54,2		54,6		54,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 10 Průběh měření vzorku č.4

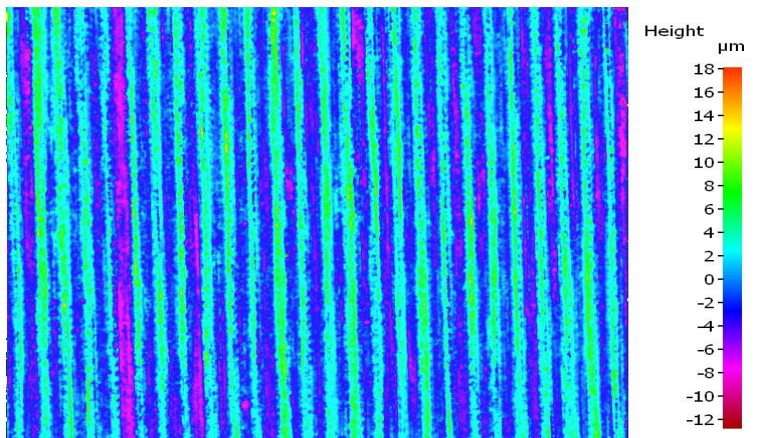
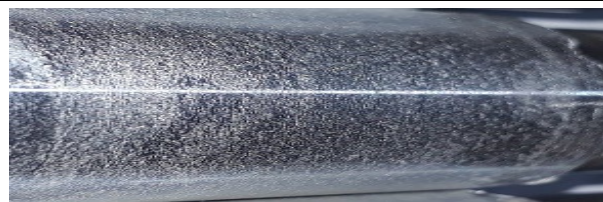
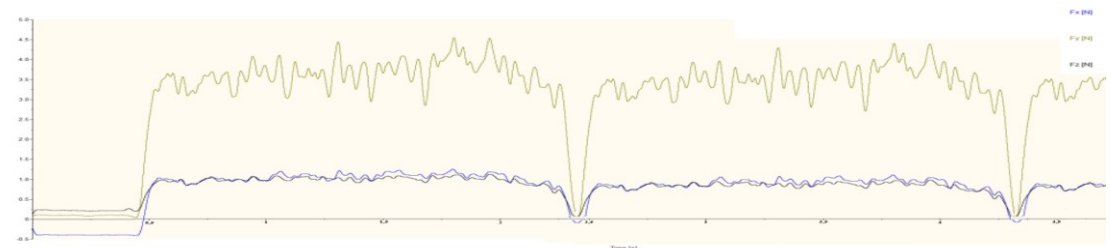
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Ni							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	150 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=8,56μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=9,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,88		F <sub>c</sub> =6,21	
		F <sub>f</sub> =0,72		F <sub>f</sub> =0,77		F <sub>f</sub> =0,83	
Celková hloubka profilu	Rz=57,17μm	F <sub>p</sub> =5,58		F <sub>p</sub> =5,86		F <sub>p</sub> =6,08	
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=5,88$	Σ=491	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,006	U=0,012
			F <sub>c</sub> =(5,88±0,012) N				
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,77$	Σ=326	s(F)=0,08	u <sub>a</sub> =0,004	U=0,008
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,008) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,86$	Σ=620	s(F)=0,15	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016
			F <sub>p</sub> =(5,86±0,016) N				
		F=(6,89±0,024) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
59,2		58,6		58,9		57,7	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
65,1		67,9		66,2		66,5	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							



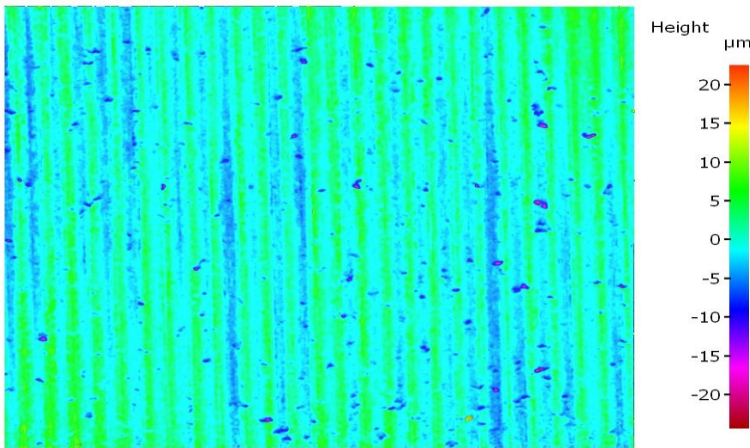
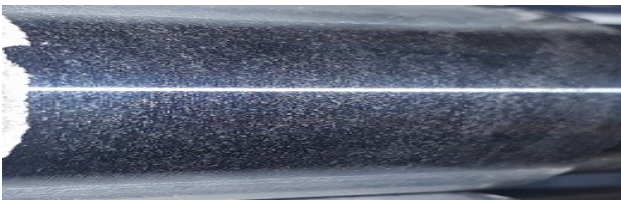
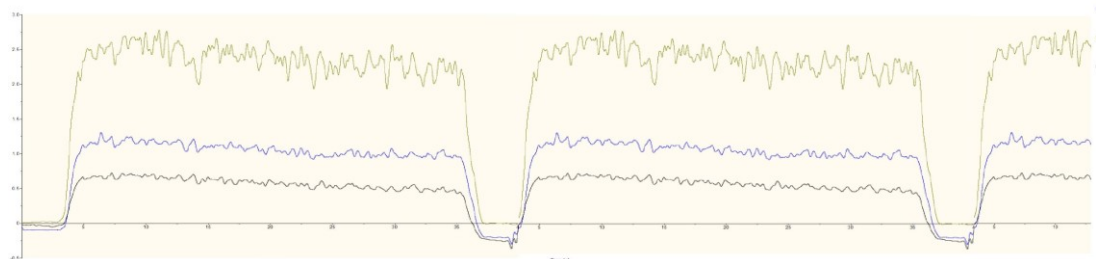
Tabulka 11 Průběh měření vzorku č.5

Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T302/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	150 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,9 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=8,36μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=9,99μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,84		F <sub>c</sub> =5,98		F <sub>c</sub> =6,21	
		F <sub>f</sub> =0,75		F <sub>f</sub> =0,79		F <sub>f</sub> =0,85	
Celková hloubka profilu	Rz=52,38μm	F <sub>p</sub> =6,12		F <sub>p</sub> =6,31		F <sub>p</sub> =6,43	
		F <sub>c</sub>	̄F=5,98	Σ=499	s(F)=0,07	u <sub>a</sub> =0,005	U=0,010
			F <sub>c</sub> =(5,98±0,010) N				
		F <sub>f</sub>	̄F=0,79	Σ=254	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,004	U=0,008
F <sub>f</sub> =(0,79±0,008) N							
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	̄F=6,31	Σ=813	s(F)=0,19	u <sub>a</sub> =0,014	U=0,038
			F <sub>p</sub> =(5,31±0,038) N				
		F=(5,23±0,031) N					
		Výsledky měření tvrdosti					
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
49,2		49,9		57,1		57,7	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
55,2		57,2		52,8		53,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 12 Průběh měření vzorku č.6

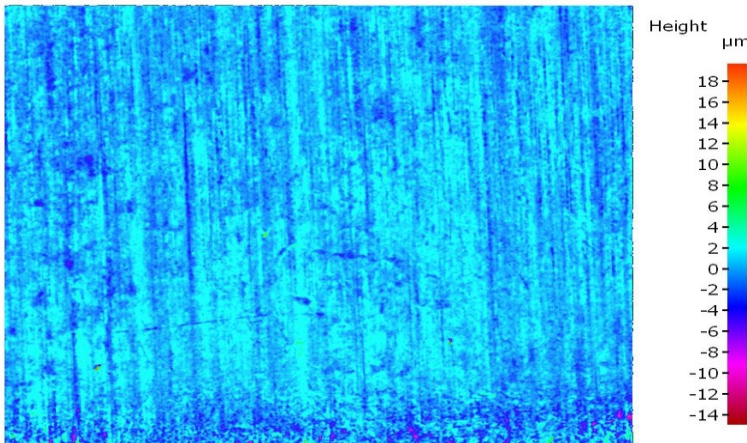

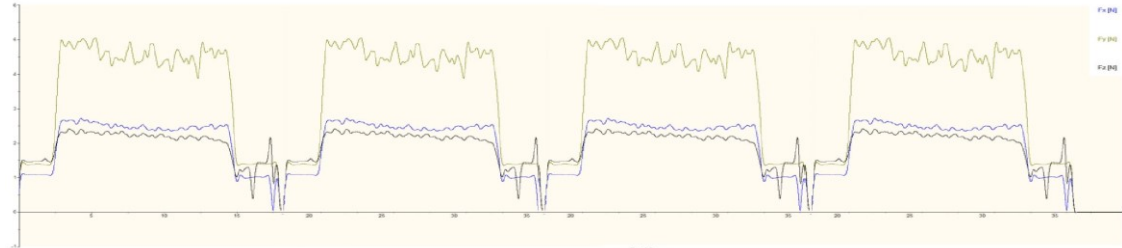
Druh břitové destičky/Mat.											
DCMT 11T302Ni											
Podmínky obrábění											
Řezná rychlost	150 m·min <sup>-1</sup>										
Posuv	0,9 mm										
Hloubka řezu	0,20 mm										
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=7,36μm										
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=9,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]				Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =6,64		F <sub>c</sub> =6,69				F <sub>c</sub> =6,73			
		F <sub>f</sub> =0,74		F <sub>f</sub> =0,77				F <sub>f</sub> =0,79			
Celková hloubka profilu	Rz=49,42μm	F <sub>p</sub> =6,76		F <sub>p</sub> =6,85				F <sub>p</sub> =6,93			
		F <sub>c</sub>	̄F=6,69	Σ=504	s(F)=0,23		u <sub>a</sub> =0,014	U=0,027			
			F <sub>c</sub> =(6,69±0,027) N								
		F <sub>f</sub>	̄F=0,77	Σ=325	s(F)=0,08		u <sub>a</sub> =0,011	U=0,022			
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,022) N								
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	̄F=6,85	Σ=763	s(F)=0,17		u <sub>a</sub> =0,010	U=0,020			
			F <sub>p</sub> =(6,85±0,020) N								
		F=(5,15±0,032) N									
Výsledky měření tvrdosti											
Před obrobením											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
51,2			52,3			52,4			53,1		
Po obrobení											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
61,1			62,8			59,9			58,8		
Poznámky k přerušovanému řezu											
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.											
											

Tabulka 13 Průběh měření vzorku č.7

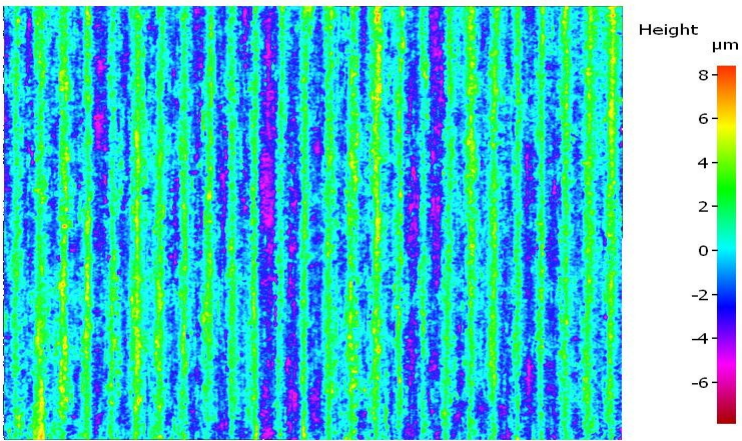

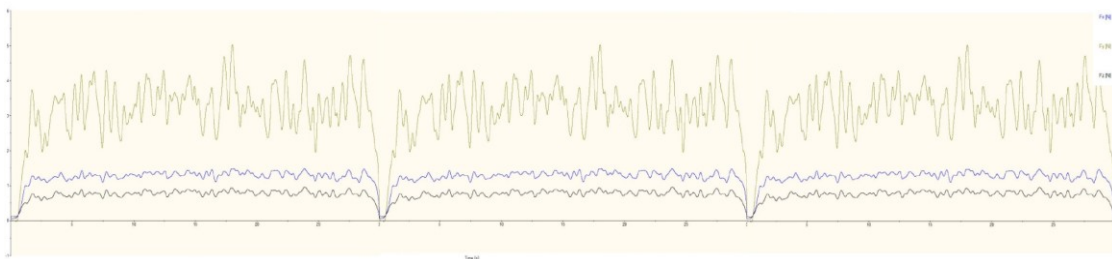
Druh břitové destičky/Mat.											
DCMT 11T308/Al											
Podmínky obrábění											
Řezná rychlost	150 m·min <sup>-1</sup>										
Posuv	0,9 mm										
Hloubka řezu	0,20 mm										
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=8,74μm										
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=11,58μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]				Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =5,53		F <sub>c</sub> =5,63				F <sub>c</sub> =5,72			
		F <sub>f</sub> =0,69		F <sub>f</sub> =0,78				F <sub>f</sub> =0,86			
Celková hloubka profilu	Rz=58,31μm	F <sub>p</sub> =5,78		F <sub>p</sub> =5,92				F <sub>p</sub> =6,09			
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=5,62$	$\Sigma=511$	$s(F)=0,09$	$u_a=0,005$	$U=0,010$				
			F <sub>c</sub> =(5,62±0,010) N								
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,78$	$\Sigma=287$	$s(F)=0,01$	$u_a=0,001$	$U=0,002$				
			F <sub>f</sub> =(0,78±0,002) N								
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,93$	$\Sigma=831$	$s(F)=0,07$	$u_a=0,006$	$U=0,012$				
			F <sub>p</sub> =(5,93±0,012) N								
		F=(5,33±0,026) N									
Výsledky měření tvrdosti											
Před obrobením											
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y					
42,5		44,8		42,1		43,5					
Po obrobení											
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y					
51,1		53,2		48,6		50,1					
Poznámky k přerušovanému řezu											
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.											
											



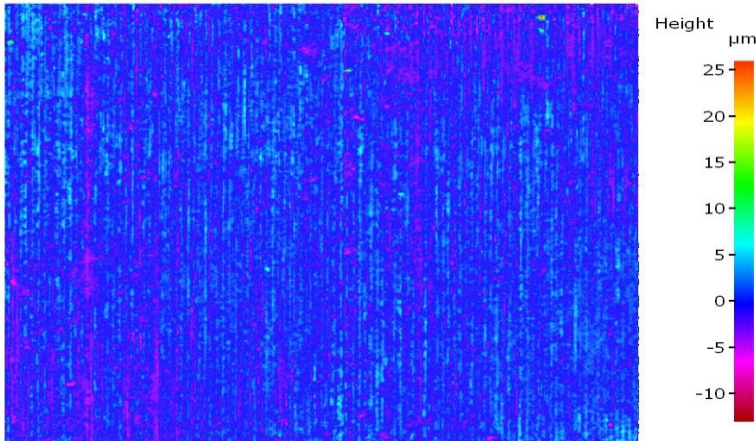
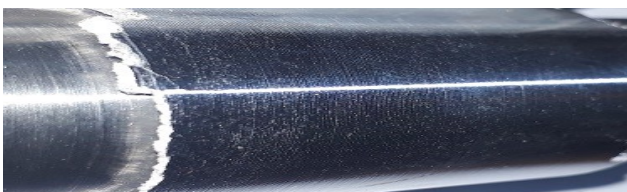
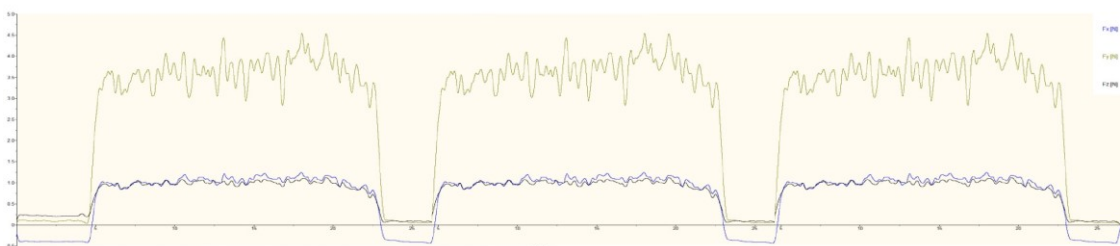
Tabulka 14 Průběh měření vzorku č.8

Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Ni							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	150 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,9 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=7,42μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=9,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,88		F <sub>c</sub> =6,21	
		F <sub>f</sub> =0,72		F <sub>f</sub> =0,77		F <sub>f</sub> =0,83	
Celková hloubka profilu	Rz=49,72μm	F <sub>p</sub> =5,58		F <sub>p</sub> =5,86		F <sub>p</sub> =6,08	
		F <sub>c</sub>	F̄=5,88	Σ=491	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,006	U=0,012
			F <sub>c</sub> =(5,88±0,012) N				
		F <sub>f</sub>	F̄=0,77	Σ=326	s(F)=0,08	u <sub>a</sub> =0,004	U=0,008
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,008) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	F̄=5,86	Σ=620	s(F)=0,15	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016
			F <sub>p</sub> =(5,86±0,016) N				
		F=(5,45±0,024) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
42,2		44,6		43,9		45,8	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
53,1		53,9		56,2		51,5	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
vyhovující.							
							

Tabulka 15 Průběh měření vzorku č.9

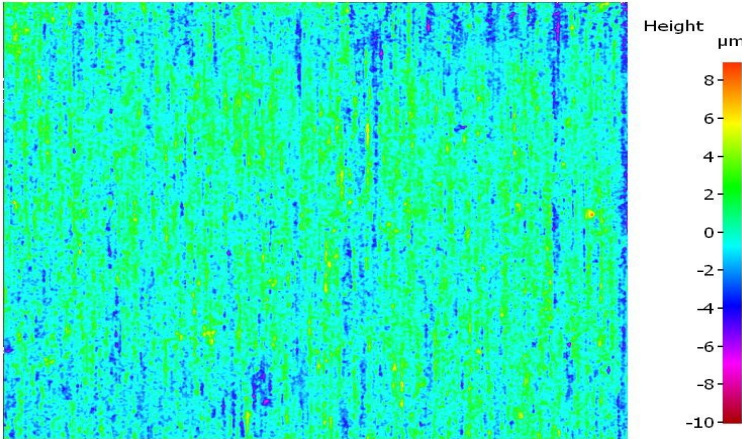
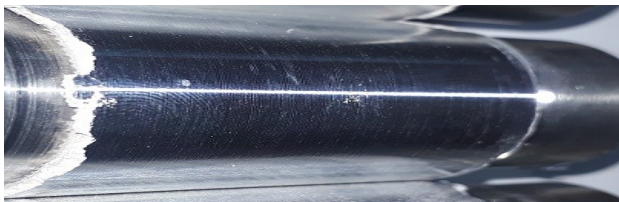
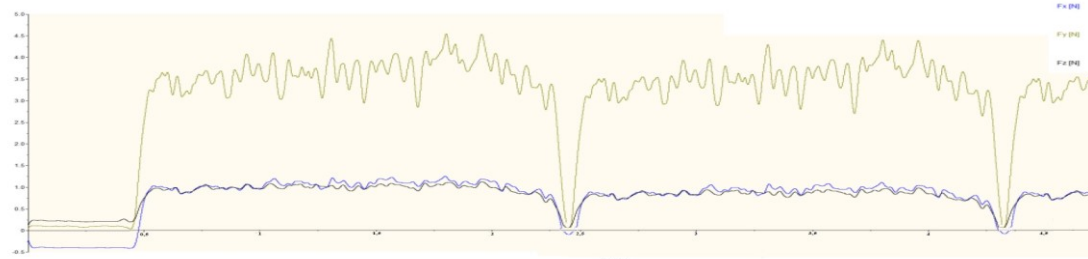
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T302/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	250 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=4,56μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=4,91μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =4,54		F <sub>c</sub> =4,65		F <sub>c</sub> =4,81	
		F <sub>f</sub> =0,64		F <sub>f</sub> =0,71		F <sub>f</sub> =0,79	
Celková hloubka profilu	Rz=58,21μm	F <sub>p</sub> =5,56		F <sub>p</sub> =5,85		F <sub>p</sub> =6,03	
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=4,66$	Σ=486	s(F)=0,13	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016
			F <sub>c</sub> =(4,66±0,016) N				
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,73$	Σ=156	s(F)=0,04	u <sub>a</sub> =0,002	U=0,004
			F <sub>f</sub> =(0,73±0,004) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,83$	Σ=720	s(F)=0,16	u <sub>a</sub> =0,009	U=0,018
			F <sub>p</sub> =(5,83±0,018) N				
		F=(4,92±0,028) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
45,2		44,8		45,8		47,7	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
52,1		49,2		51,8		52,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 16 Průběh měření vzorku č.10

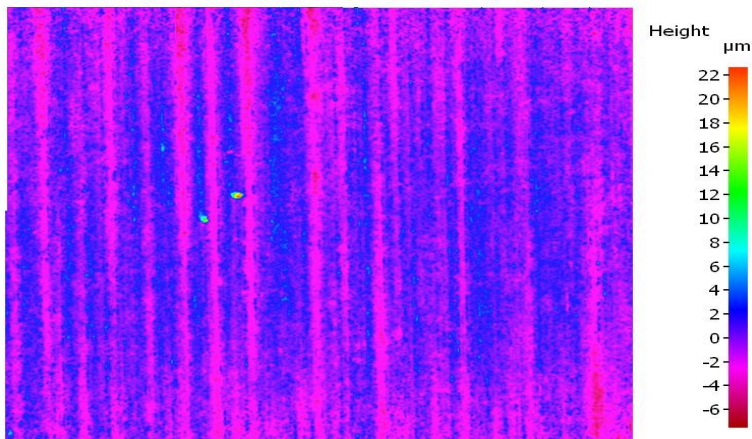

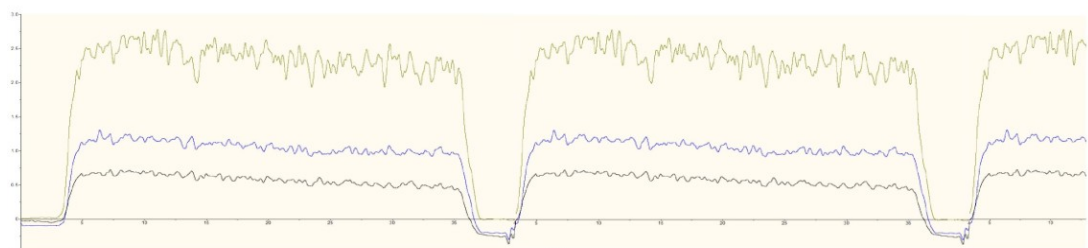
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T302/Ni							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	250 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=6,76μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=4,52μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,02		F <sub>c</sub> =5,42		F <sub>c</sub> =5,81	
		F <sub>f</sub> =0,76		F <sub>f</sub> =0,82		F <sub>f</sub> =0,88	
Celková hloubka profilu	Rz=42,41μm	F <sub>p</sub> =4,12		F <sub>p</sub> =4,20		F <sub>p</sub> =4,28	
		F <sub>c</sub>	̄F=5,43	Σ=912	s(F)=0,19	u <sub>a</sub> =0,010	U=0,020
			F <sub>c</sub> =(5,43±0,020) N				
		F <sub>f</sub>	̄F=0,81	Σ=240	s(F)=0,07	u <sub>a</sub> =0,003	U=0,006
			F <sub>f</sub> =(0,81±0,006) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	̄F=4,19	Σ=830	s(F)=0,18	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016
			F <sub>p</sub> =(4,19±0,016) N				
		F=(6,17±0,022) N					
		Výsledky měření tvrdosti					
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
62,3		60,8		61,8		59,2	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
68,5		66,6		69,7		67,6	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							



Tabulka 17 Průběh měření vzorku č.11

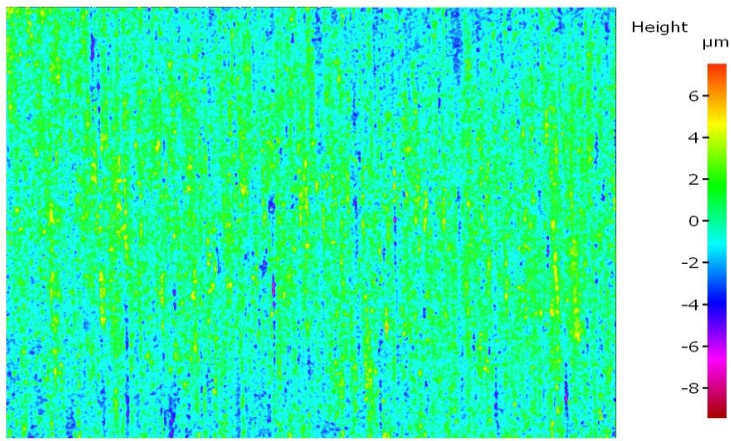
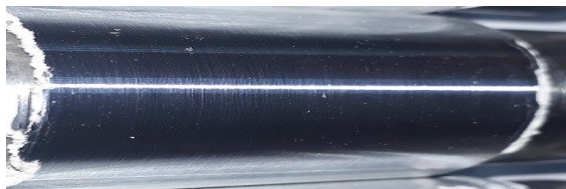
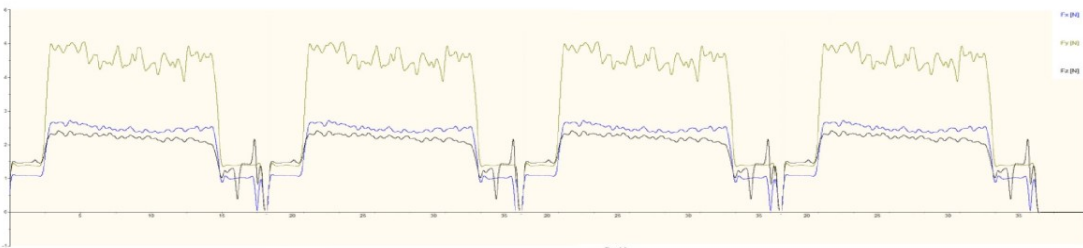
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	250 m min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=5,24μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=4,58μm	Minimální hodnoty [N]	Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]		
		F <sub>c</sub> =5,53	F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,72		
		F <sub>f</sub> =0,69	F <sub>f</sub> =0,78		F <sub>f</sub> =0,86		
Celková hloubka profilu	Rz=65,84μm	F <sub>p</sub> =5,78		F <sub>p</sub> =5,92		F <sub>p</sub> =6,09	
		F <sub>c</sub>	F̄=5,62	Σ=511	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,005	U=0,010
			F <sub>c</sub> =(5,62±0,010) N				
		F <sub>f</sub>	F̄=0,78	Σ=287	s(F)=0,01	u <sub>a</sub> =0,001	U=0,002
			F <sub>f</sub> =(0,78±0,002) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	F̄=5,93	Σ=831	s(F)=0,07	u <sub>a</sub> =0,006	U=0,012
			F <sub>p</sub> =(5,93±0,012) N				
		F=(7,19±0,026) N					
		Výsledky měření tvrdosti					
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
47,5		48,8		48,1		49,5	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
55,1		54,2		53,6		57,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 18 Průběh měření vzorku č.12

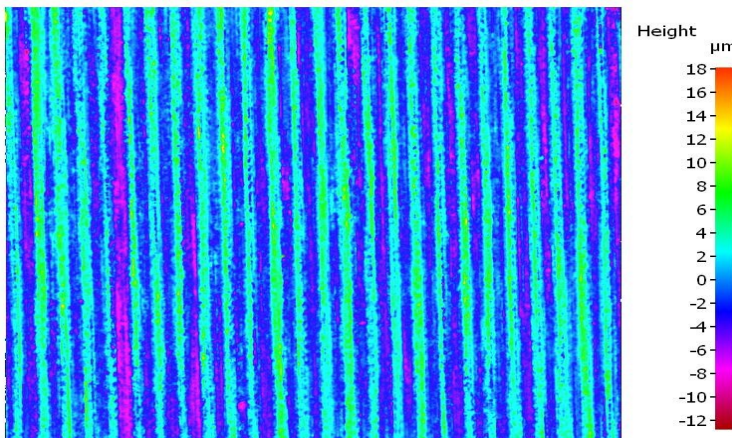
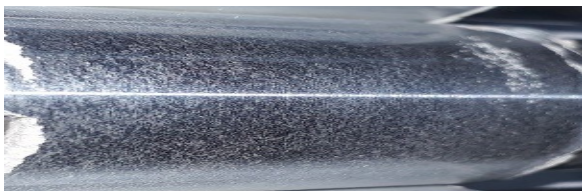
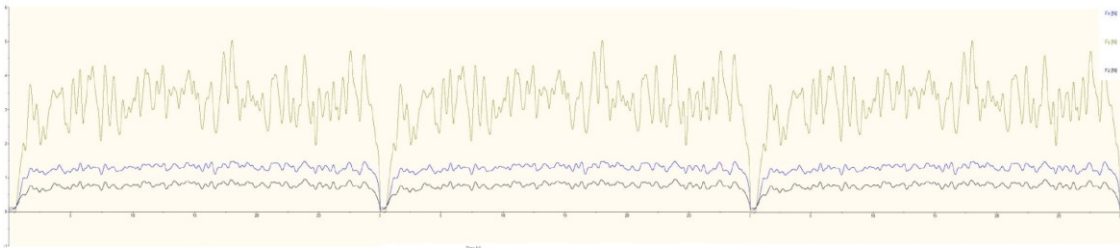
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Ni							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	250 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=4,55μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=4,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,88		F <sub>c</sub> =6,21	
		F <sub>f</sub> =0,72		F <sub>f</sub> =0,77		F <sub>f</sub> =0,83	
Celková hloubka profilu	Rz=48,44μm	F <sub>p</sub> =5,58		F <sub>p</sub> =5,86		F <sub>p</sub> =6,08	
		F <sub>c</sub>	F̄=5,88	Σ=491	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,006	U=0,012
			F <sub>c</sub> =(5,88±0,012) N				
		F <sub>f</sub>	F̄=0,77	Σ=326	s(F)=0,08	u <sub>a</sub> =0,004	U=0,008
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,008) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	F̄=5,86	Σ=620	s(F)=0,15	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016
			F <sub>p</sub> =(5,86±0,016) N				
		F=(7,46±0,024) N					
		Výsledky měření tvrdosti					
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
62,2		60,6		61,9		59,8	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
69,1		68,9		66,2		67,5	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							



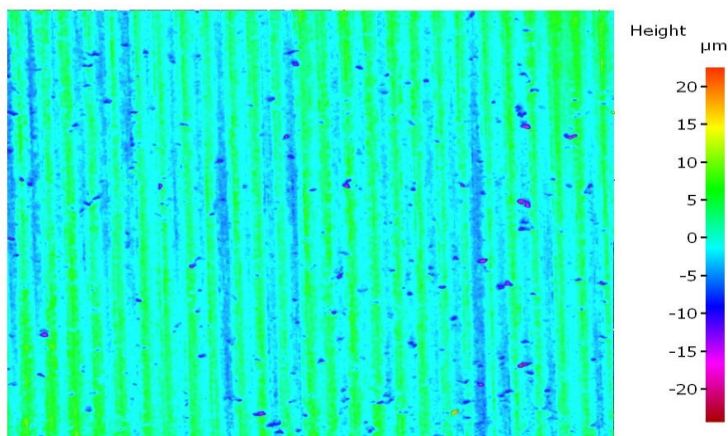
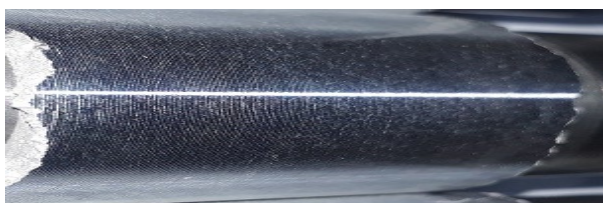
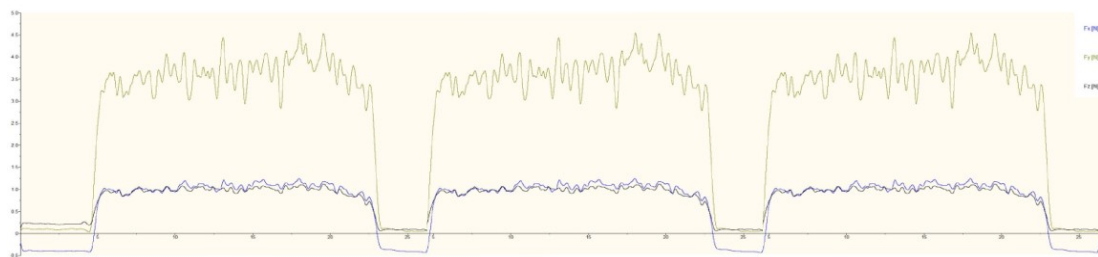
Tabulka 19 Průběh měření vzorku č.13

Druh břitové destičky/Mat.											
DCMT 11T302/Al											
Podmínky obrábění											
Řezná rychlost	250 m·min <sup>-1</sup>										
Posuv	0,9 mm										
Hloubka řezu	0,20 mm										
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=5,31μm										
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=5,99μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]				Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =5,84		F <sub>c</sub> =5,98				F <sub>c</sub> =6,21			
		F <sub>f</sub> =0,75		F <sub>f</sub> =0,79				F <sub>f</sub> =0,85			
Celková hloubka profilu	Rz=53,43μm	F <sub>p</sub> =6,12		F <sub>p</sub> =6,31				F <sub>p</sub> =6,43			
		F <sub>c</sub>	F̄=5,98		Σ=499	s(F)=0,07		u <sub>a</sub> =0,005		U=0,010	
			F <sub>c</sub> =(5,98±0,010) N								
		F <sub>f</sub>	F̄=0,79		Σ=254	s(F)=0,09		u <sub>a</sub> =0,004		U=0,008	
			F <sub>f</sub> =(0,79±0,008) N								
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	F̄=6,31		Σ=813	s(F)=0,19		u <sub>a</sub> =0,014		U=0,038	
			F <sub>p</sub> =(5,31±0,038) N								
		F=(6,48±0,031) N									
Výsledky měření tvrdosti											
Před obrobením											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
53,2			51,9			50,1			52,7		
Po obrobení											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
57,1			58,2			55,8			59,1		
Poznámky k přerušovanému řezu											
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.											
											

Tabulka 20 Průběh měření vzorku č.14

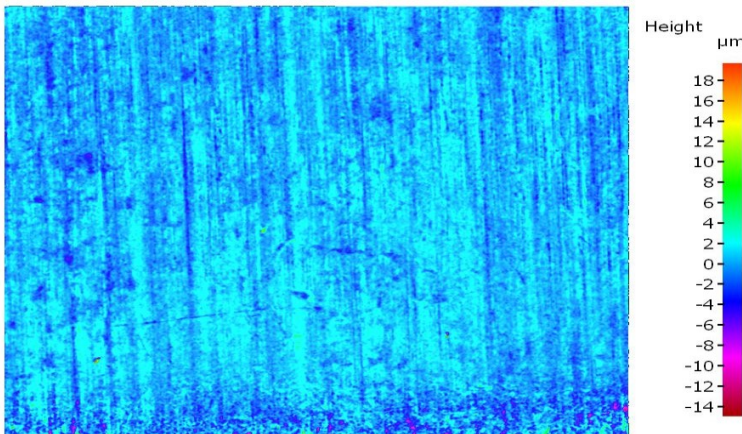

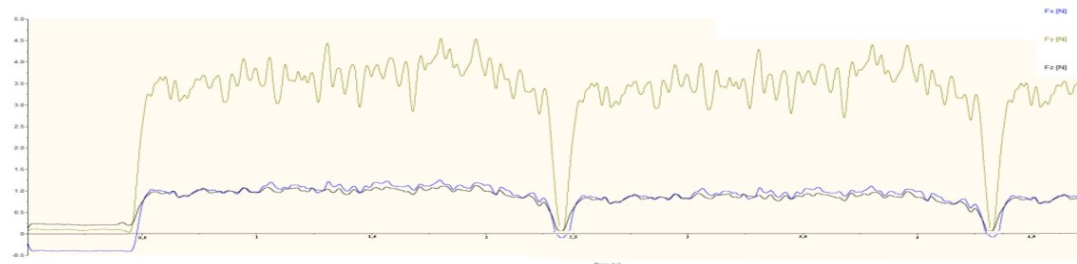
Druh břitové destičky/Mat.		<div><div>Height <math>\mu\text{m}</math></div><div></div></div>									
DCMT 11T302Ni											
Podmínky obrábění											
Řezná rychlost	250 m·min <sup>-1</sup>										
Posuv	0,9 mm										
Hloubka řezu	0,20 mm										
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=3,31μm										
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=5,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]				Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =6,64		F <sub>c</sub> =6,69				F <sub>c</sub> =6,73			
		F <sub>f</sub> =0,74		F <sub>f</sub> =0,77				F <sub>f</sub> =0,79			
Celková hloubka profilu	Rz=48,42μm	F <sub>p</sub> =6,76		F <sub>p</sub> =6,85				F <sub>p</sub> =6,93			
		F <sub>c</sub>	F̄=6,69	Σ=504	s(F)=0,23	u <sub>a</sub> =0,014		U=0,027			
			F <sub>c</sub> =(6,69±0,027) N								
		F <sub>f</sub>	F̄=0,77	Σ=325	s(F)=0,08	u <sub>a</sub> =0,011		U=0,022			
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,022) N								
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	F̄=6,85	Σ=763	s(F)=0,17	u <sub>a</sub> =0,010		U=0,020			
			F <sub>p</sub> =(6,85±0,020) N								
		F=(5,68±0,032) N									
Výsledky měření tvrdosti											
Před obrobením											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
61,2			62,3			63,4			59,1		
Po obrobení											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
68,1			69,8			69,9			66,8		
Poznámky k přerušovanému řezu			<div><div></div><div></div></div>								
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.											
<div><div></div><div></div></div>											

Tabulka 21 Průběh měření vzorku č.15

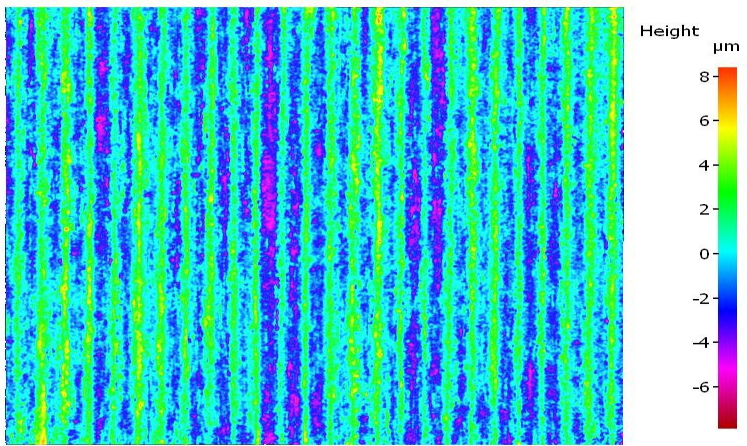
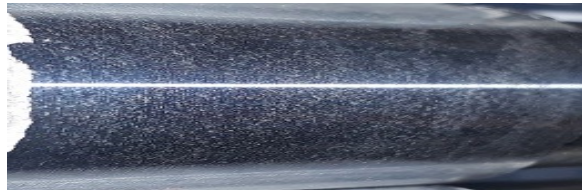
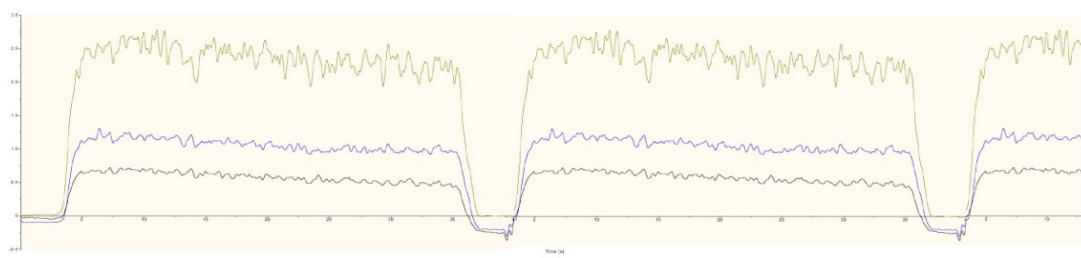
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	250 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,9 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=4,74μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=6,58μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,53		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,72	
		F <sub>f</sub> =0,69		F <sub>f</sub> =0,78		F <sub>f</sub> =0,86	
Celková hloubka profilu	Rz=59,43μm	F <sub>p</sub> =5,78		F <sub>p</sub> =5,92		F <sub>p</sub> =6,09	
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=5,62$	$\Sigma=511$	$s(F)=0,09$	$u_a=0,005$	$U=0,010$
			$F_c=(5,62\pm0,010) \text{ N}$				
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,78$	$\Sigma=287$	$s(F)=0,01$	$u_a=0,001$	$U=0,002$
			$F_f=(0,78\pm0,002) \text{ N}$				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,93$	$\Sigma=831$	$s(F)=0,07$	$u_a=0,006$	$U=0,012$
			$F_p=(5,93\pm0,012) \text{ N}$				
		$F=(6,67\pm0,026) \text{ N}$					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
64,5		64,8		62,1		61,5	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
68,1		70,2		67,6		69,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							



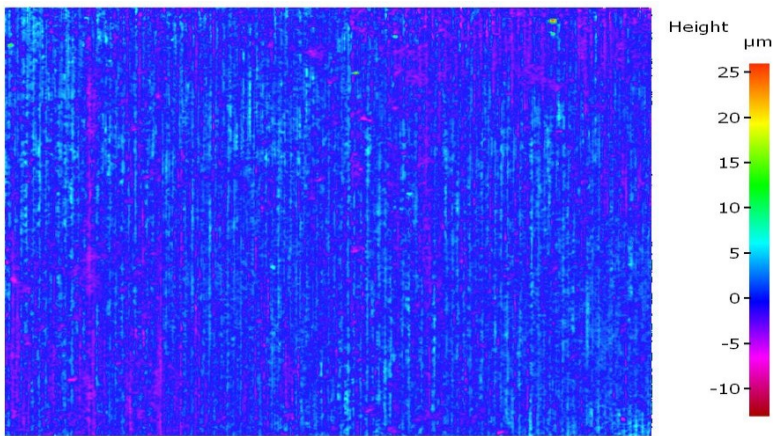

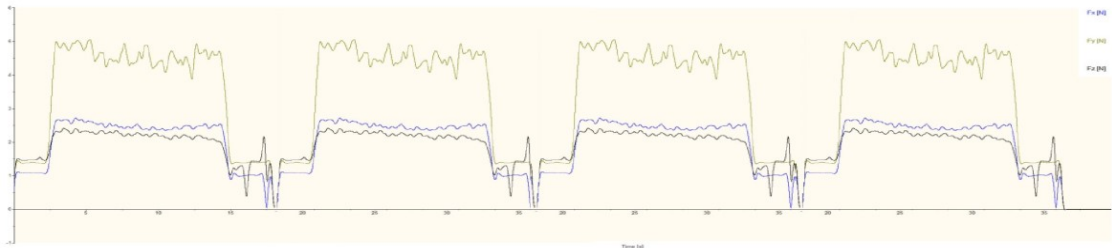
Tabulka 22 Průběh měření vzorku č.16

Druh břitové destičky/Mat.											
DCMT 11T308/Ni											
Podmínky obrábění											
Řezná rychlost	250 m·min <sup>-1</sup>										
Posuv	0,9 mm										
Hloubka řezu	0,20 mm										
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=3,98μm										
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=4,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]				Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,88				F <sub>c</sub> =6,21			
		F <sub>f</sub> =0,72		F <sub>f</sub> =0,77				F <sub>f</sub> =0,83			
Celková hloubka profilu	Rz=54,42μm	F <sub>p</sub> =5,58		F <sub>p</sub> =5,86				F <sub>p</sub> =6,08			
		F <sub>c</sub>	ƒ=5,88	Σ=491	s(F)=0,09		u <sub>a</sub> =0,006		U=0,012		
			F <sub>c</sub> =(5,88±0,012) N								
		F <sub>f</sub>	ƒ=0,77	Σ=326	s(F)=0,08		u <sub>a</sub> =0,004		U=0,008		
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,008) N								
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	ƒ=5,86	Σ=620	s(F)=0,15		u <sub>a</sub> =0,008		U=0,016		
			F <sub>p</sub> =(5,86±0,016) N								
		F=(9,41±0,024) N									
		Výsledky měření tvrdosti									
Před obrobením											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
63,2			61,6			50,9			59,8		
Po obrobení											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
69,1			68,9			65,2			66,5		
Poznámky k přerušovanému řezu											
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.											
											

Tabulka 23 Průběh měření vzorku č.17

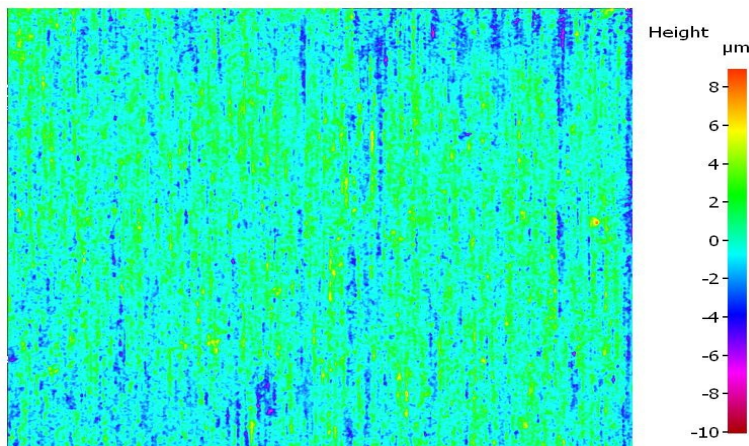

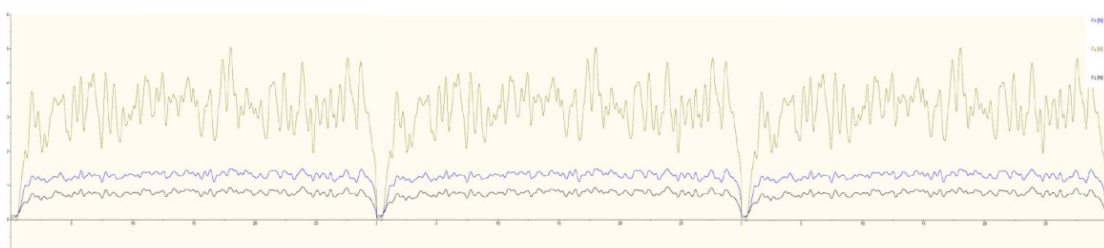
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T302/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=2,81μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=3,91μm	Minimální hodnoty [N]	Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]		
		F <sub>c</sub> =4,54	F <sub>c</sub> =4,65		F <sub>c</sub> =4,81		
		F <sub>f</sub> =0,64	F <sub>f</sub> =0,71		F <sub>f</sub> =0,79		
Celková hloubka profilu	Rz=48,74μm	F <sub>p</sub> =5,56	F <sub>p</sub> =5,85		F <sub>p</sub> =6,03		
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=4,66$	Σ=486	s(F)=0,13	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016
			F <sub>c</sub> =(4,66±0,016) N				
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,73$	Σ=156	s(F)=0,04	u <sub>a</sub> =0,002	U=0,004
			F <sub>f</sub> =(0,73±0,004) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,83$	Σ=720	s(F)=0,16	u <sub>a</sub> =0,009	U=0,018
			F <sub>p</sub> =(5,83±0,018) N				
		F=(8,27±0,028) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
56,2		56,8		55,8		55,7	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
65,1		61,2		59,8		61,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 24 Průběh měření vzorku č.18

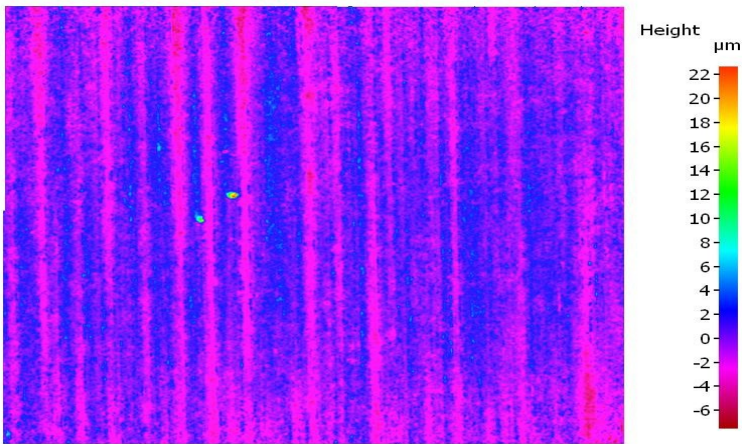
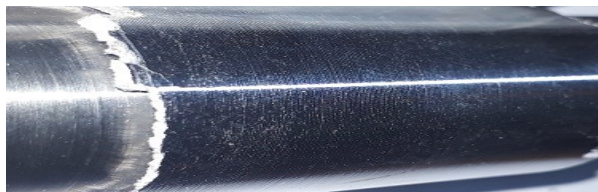
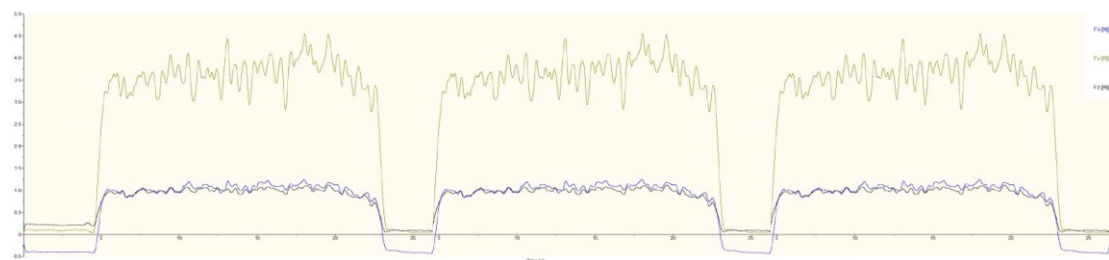
Druh břitové destičky/Mat.									
DCMT 11T302/Ni									
Podmínky obrábění									
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>								
Posuv	0,3 mm								
Hloubka řezu	0,20 mm								
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=2,11μm								
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=3,52μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =5,02		F <sub>c</sub> =5,42		F <sub>c</sub> =5,81			
		F <sub>f</sub> =0,76		F <sub>f</sub> =0,82		F <sub>f</sub> =0,88			
Celková hloubka profilu	Rz=43,41μm	F <sub>p</sub> =4,12		F <sub>p</sub> =4,20		F <sub>p</sub> =4,28			
		F <sub>c</sub>	ƒ=5,43	Σ=912	s(F)=0,19	u <sub>a</sub> =0,010	U=0,020		
			F <sub>c</sub> =(5,43±0,020) N						
		F <sub>f</sub>	ƒ=0,81	Σ=240	s(F)=0,07	u <sub>a</sub> =0,003	U=0,006		
			F <sub>f</sub> =(0,81±0,006) N						
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	ƒ=4,19	Σ=830	s(F)=0,18	u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016		
			F <sub>p</sub> =(4,19±0,016) N						
		F=(9,21±0,022) N							
Výsledky měření tvrdosti									
Před obrobením									
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y			
64,3		65,8		66,8		64,2			
Po obrobení									
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y			
72,5		73,6		70,7		70,6			
Poznámky k přerušovanému řezu									
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.									
									



Tabulka 25 Průběh měření vzorku č.19

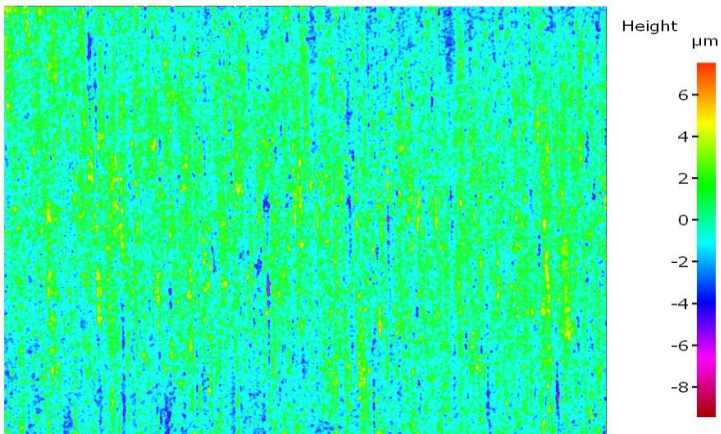
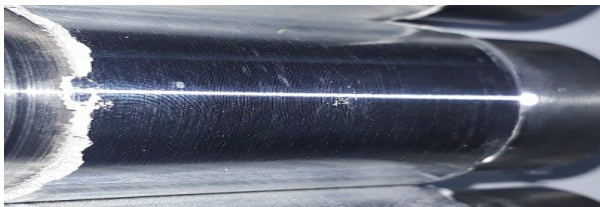
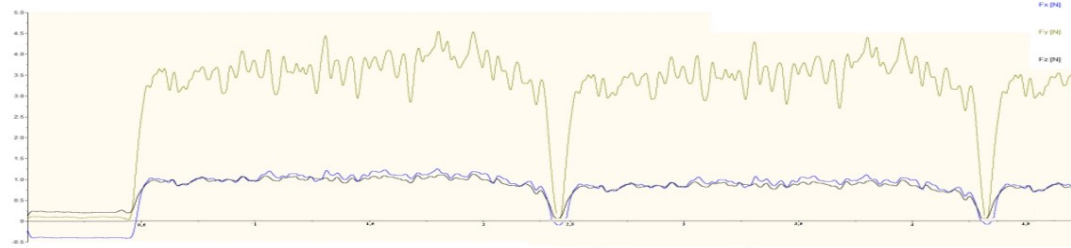
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,3 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=1,98μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=3,58μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,53		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,72	
		F <sub>f</sub> =0,69		F <sub>f</sub> =0,78		F <sub>f</sub> =0,86	
Celková hloubka profilu	Rz=58,3μm	F <sub>p</sub> =5,78		F <sub>p</sub> =5,92		F <sub>p</sub> =6,09	
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=5,62$	Σ=511	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,005	U=0,010
			F <sub>c</sub> =(5,62±0,010) N				
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,78$	Σ=287	s(F)=0,01	u <sub>a</sub> =0,001	U=0,002
			F <sub>f</sub> =(0,78±0,002) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,93$	Σ=831	s(F)=0,07	u <sub>a</sub> =0,006	U=0,012
			F <sub>p</sub> =(5,93±0,012) N				
		F=(9,71±0,026) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
63,5		61,8		61,1		60,5	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
70,1		67,2		67,6		68,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 26 Průběh měření vzorku č.20

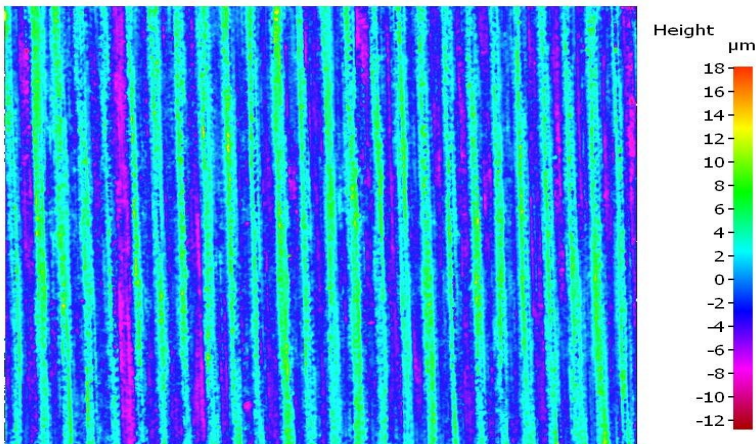

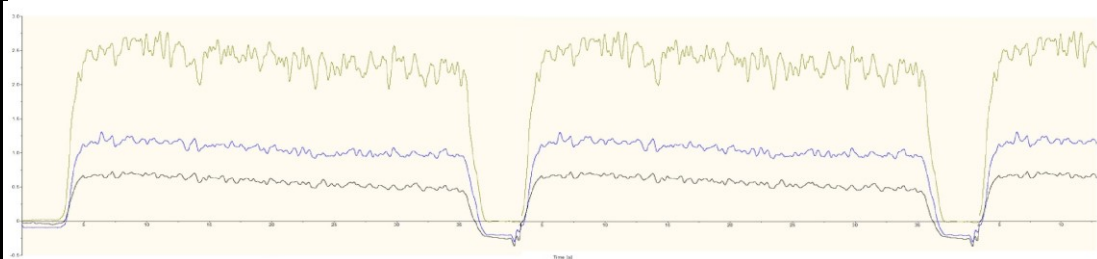
Druh břitové destičky/Mat.											
DCMT 11T308/Ni											
Podmínky obrábění											
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>										
Posuv	0,3 mm										
Hloubka řezu	0,20 mm										
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=2,12μm										
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=3,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]				Maximální hodnoty [N]			
		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,88				F <sub>c</sub> =6,21			
		F <sub>f</sub> =0,72		F <sub>f</sub> =0,77				F <sub>f</sub> =0,83			
Celková hloubka profilu	Rz=49,4μm	F <sub>p</sub> =5,58		F <sub>p</sub> =5,86				F <sub>p</sub> =6,08			
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=5,88$	$\Sigma=491$	$s(F)=0,09$	$u_a=0,006$		$U=0,012$			
			F <sub>c</sub> =(5,88±0,012) N								
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,77$	$\Sigma=326$	$s(F)=0,08$	$u_a=0,004$		$U=0,008$			
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,008) N								
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,86$	$\Sigma=620$	$s(F)=0,15$	$u_a=0,008$		$U=0,016$			
			F <sub>p</sub> =(5,86±0,016) N								
		F=(11,74±0,024) N									
Výsledky měření tvrdosti											
Před obrobením											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
66,2			64,6			65,9			67,8		
Po obrobení											
Meření č.1 HR15Y			Meření č.2 HR15Y			Meření č.3 HR15Y			Meření č.4 HR15Y		
70,1			71,9			72,2			73,5		
Poznámky k přerušovanému řezu											
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.											
											



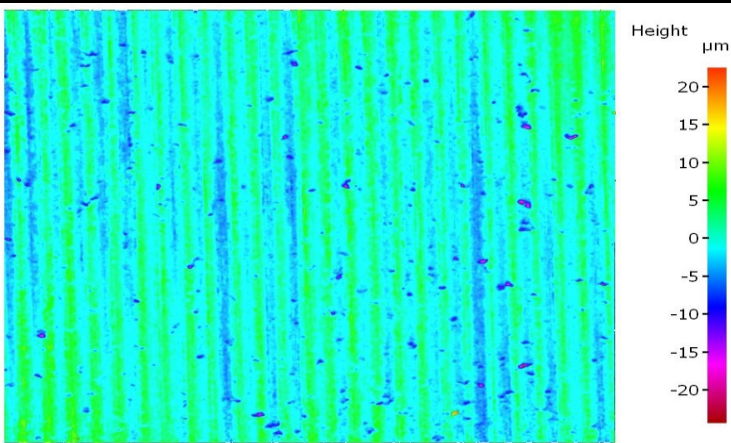
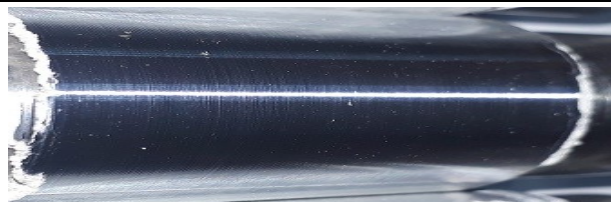
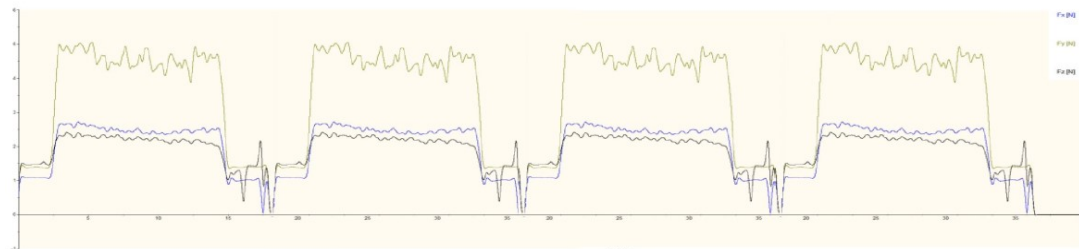
Tabulka 27 Průběh měření vzorku č.21

Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T302/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,9 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=1,36μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=3,99μm	Minimální hodnoty [N]	Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]		
		F <sub>c</sub> =5,84	F <sub>c</sub> =5,98		F <sub>c</sub> =6,21		
		F <sub>f</sub> =0,75	F <sub>f</sub> =0,79		F <sub>f</sub> =0,85		
Celková hloubka profilu	Rz=51,14μm	F <sub>p</sub> =6,12	F <sub>p</sub> =6,31		F <sub>p</sub> =6,43		
		F <sub>c</sub>	F̄=5,98	Σ=499	s(F)=0,07	u <sub>a</sub> =0,005	U=0,010
			F <sub>c</sub> =(5,98±0,010) N				
		F <sub>f</sub>	F̄=0,79	Σ=254	s(F)=0,09	u <sub>a</sub> =0,004	U=0,008
			F <sub>f</sub> =(0,79±0,008) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	F̄=6,31	Σ=813	s(F)=0,19	u <sub>a</sub> =0,014	U=0,038
			F <sub>p</sub> =(5,31±0,038) N				
		F=(9,03±0,031) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
57,2		58,9		56,1		55,7	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
64,1		65,2		62,8		61,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 28 Průběh měření vzorku č.22

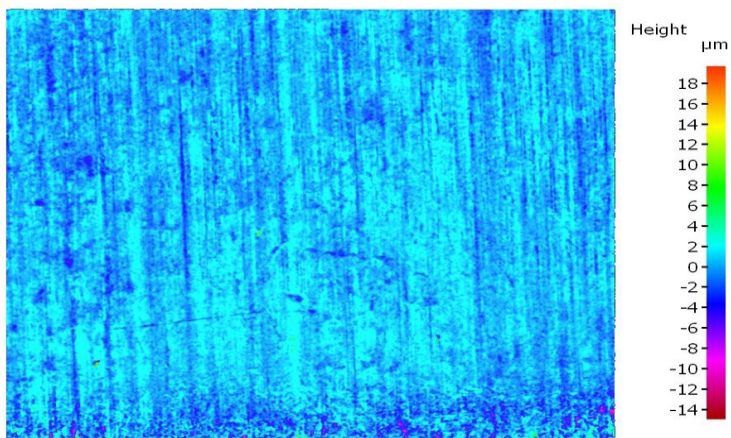
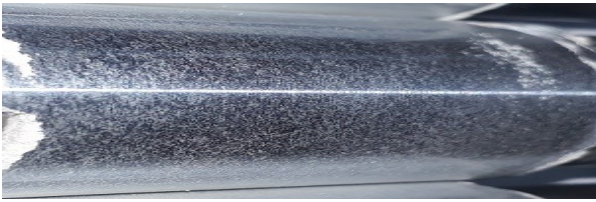
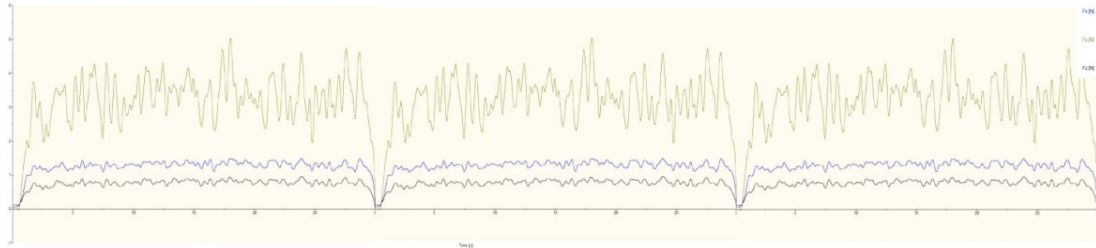
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T302Ni							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,9 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=1,11μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=2,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =6,64		F <sub>c</sub> =6,69		F <sub>c</sub> =6,73	
		F <sub>f</sub> =0,74		F <sub>f</sub> =0,77		F <sub>f</sub> =0,79	
Celková hloubka profilu	Rz=51,11μm	F <sub>p</sub> =6,76		F <sub>p</sub> =6,85		F <sub>p</sub> =6,93	
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=6,69$	Σ=504	s(F)=0,23	u <sub>a</sub> =0,014	U=0,027
			F <sub>c</sub> =(6,69±0,027) N				
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,77$	Σ=325	s(F)=0,08	u <sub>a</sub> =0,011	U=0,022
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,022) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}=6,85$	Σ=763	s(F)=0,17	u <sub>a</sub> =0,010	U=0,020
			F <sub>p</sub> =(6,85±0,020) N				
		F=(10,24±0,032) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
66,2		65,3		66,4		64,1	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
71,1		70,8		72,9		69,8	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

Tabulka 29 Průběh měření vzorku č.23

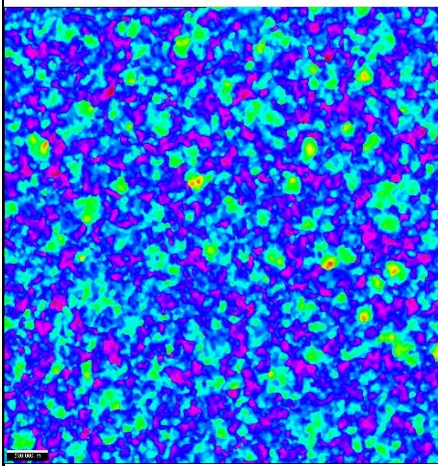
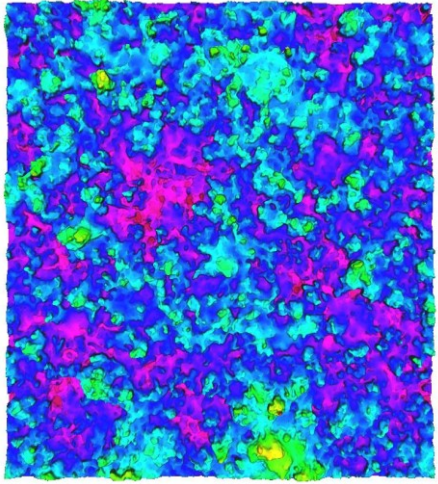
Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Al							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,9 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=1,54μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=2,58μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,53	F <sub>c</sub> =5,63	F <sub>c</sub> =5,72			
Celková hloubka profilu	Rz=53,13μm	F <sub>f</sub> =0,69		F <sub>f</sub> =0,78		F <sub>f</sub> =0,86	
		F <sub>p</sub> =5,78		F <sub>p</sub> =5,92		F <sub>p</sub> =6,09	
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}=5,62$	$\Sigma=511$	$s(F)=0,09$	$u_a=0,005$	$U=0,010$
			F <sub>c</sub> =(5,62±0,010) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>f</sub>	$\bar{F}=0,78$	$\Sigma=287$	$s(F)=0,01$	$u_a=0,001$	$U=0,002$
			F <sub>f</sub> =(0,78±0,002) N				
		F <sub>p</sub>	$\bar{F}=5,93$	$\Sigma=831$	$s(F)=0,07$	$u_a=0,006$	$U=0,012$
			F <sub>p</sub> =(5,93±0,012) N				
F=(10,75±0,026) N							
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
56,5		54,8		56,1		55,5	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
62,1		64,2		61,6		61,1	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							



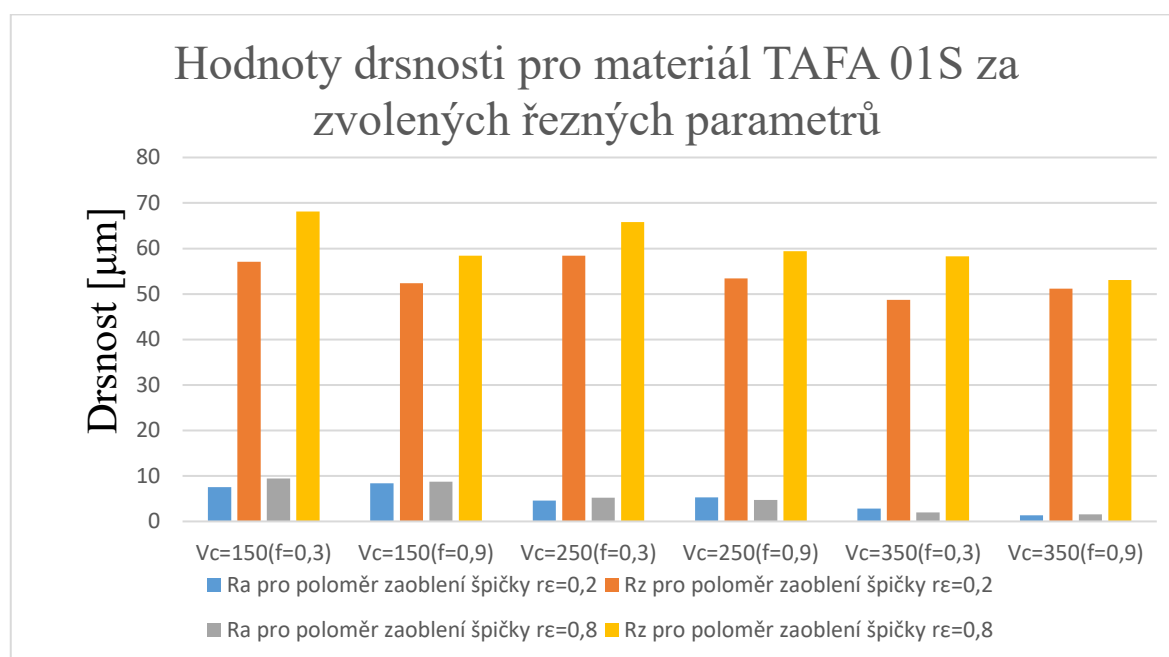
Tabulka 30 Průběh měření vzorku č.24

Druh břitové destičky/Mat.							
DCMT 11T308/Ni							
Podmínky obrábění							
Řezná rychlost	350 m·min <sup>-1</sup>						
Posuv	0,9 mm						
Hloubka řezu	0,20 mm						
Střední aritmetická odchylka profilu	Ra=1,56μm						
Střední kvadratická odchylka profilu	Rq=2,61μm	Minimální hodnoty [N]		Střední hodnoty [N]		Maximální hodnoty [N]	
		F <sub>c</sub> =5,63		F <sub>c</sub> =5,88		F <sub>c</sub> =6,21	
		F <sub>f</sub> =0,72		F <sub>f</sub> =0,77		F <sub>f</sub> =0,83	
Celková hloubka profilu	Rz=57,15μm	F <sub>p</sub> =5,58		F <sub>p</sub> =5,86		F <sub>p</sub> =6,08	
		F <sub>c</sub>	$\bar{F}$ =5,88 Σ=491	s(F)=0,09		u <sub>a</sub> =0,006	U=0,012
			F <sub>c</sub> =(5,88±0,012) N				
		F <sub>f</sub>	$\bar{F}$ =0,77 Σ=326	s(F)=0,08		u <sub>a</sub> =0,004	U=0,008
			F <sub>f</sub> =(0,77±0,008) N				
Mezní vlnová délka	Lc=8000μm	F <sub>p</sub>	$\bar{F}$ =5,86 Σ=620	s(F)=0,15		u <sub>a</sub> =0,008	U=0,016
			F <sub>p</sub> =(5,86±0,016) N				
		F=(12,37±0,024) N					
Výsledky měření tvrdosti							
Před obrobením							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
67,2		66,6		65,9		66,8	
Po obrobení							
Meření č.1 HR15Y		Meření č.2 HR15Y		Meření č.3 HR15Y		Meření č.4 HR15Y	
72,1		73,9		72,2		71,5	
Poznámky k přerušovanému řezu							
Vizuální kontrola obráběné hrany simulující přerušovaný řez je vyhovující.							
							

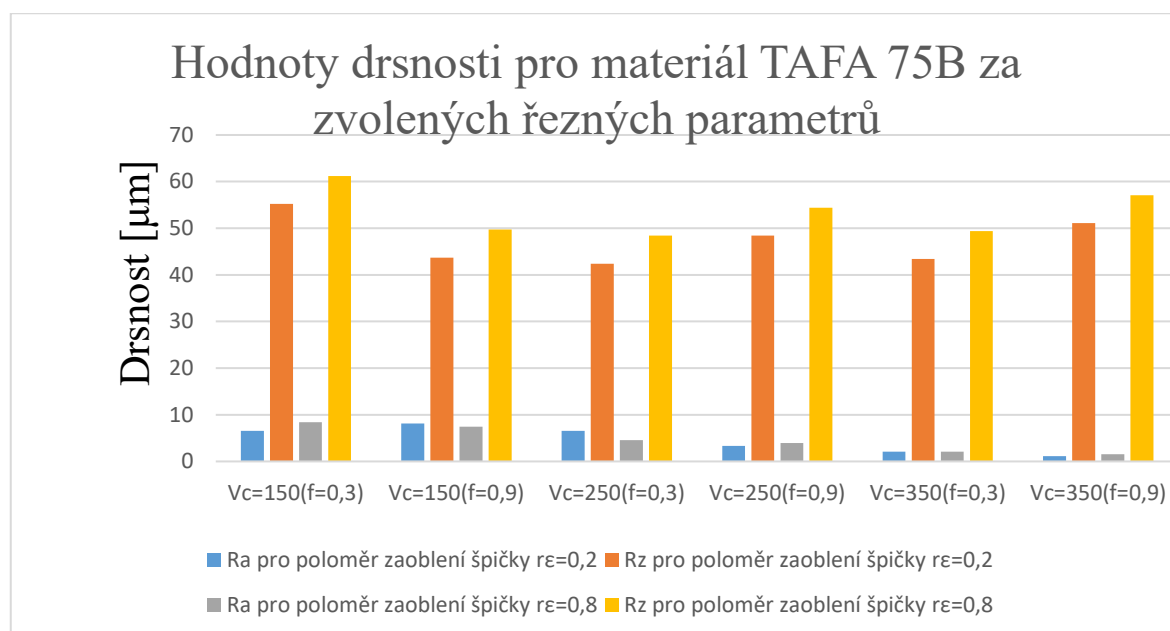
Tabulka 31 Hodnoty drsnosti neobrobených materiálu TAFA 01S a TAFA 75B

Materiál TAFA 01S		Materiál TAFA 75B	
			
Ra = 19,85 μm	Rz = 139,09 μm	Ra = 18,15 μm	Rz = 137,41 μm

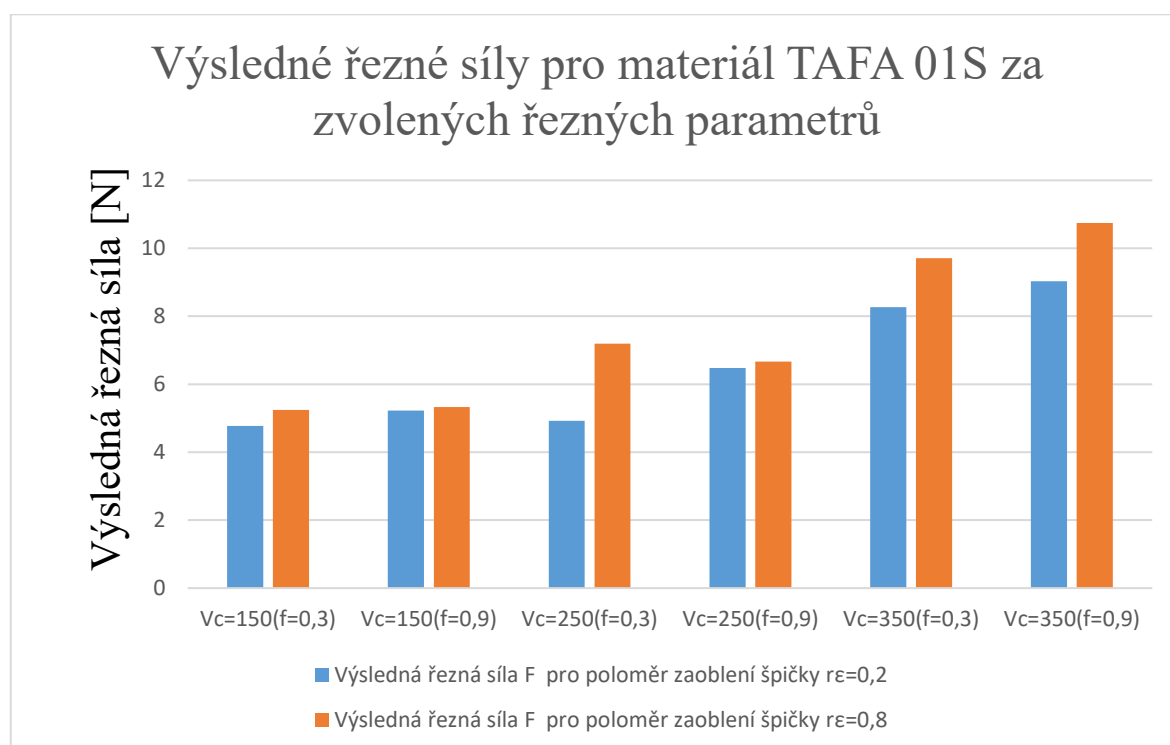
#### 4.4 Grafické znázornění výsledků



Graf 4.1 Výsledné hodnoty drsnosti materiálu TAFA 01S obrobeného pomocí zvolených řezných parametrů a VBD s odlišným poloměrem zaoblení špičky

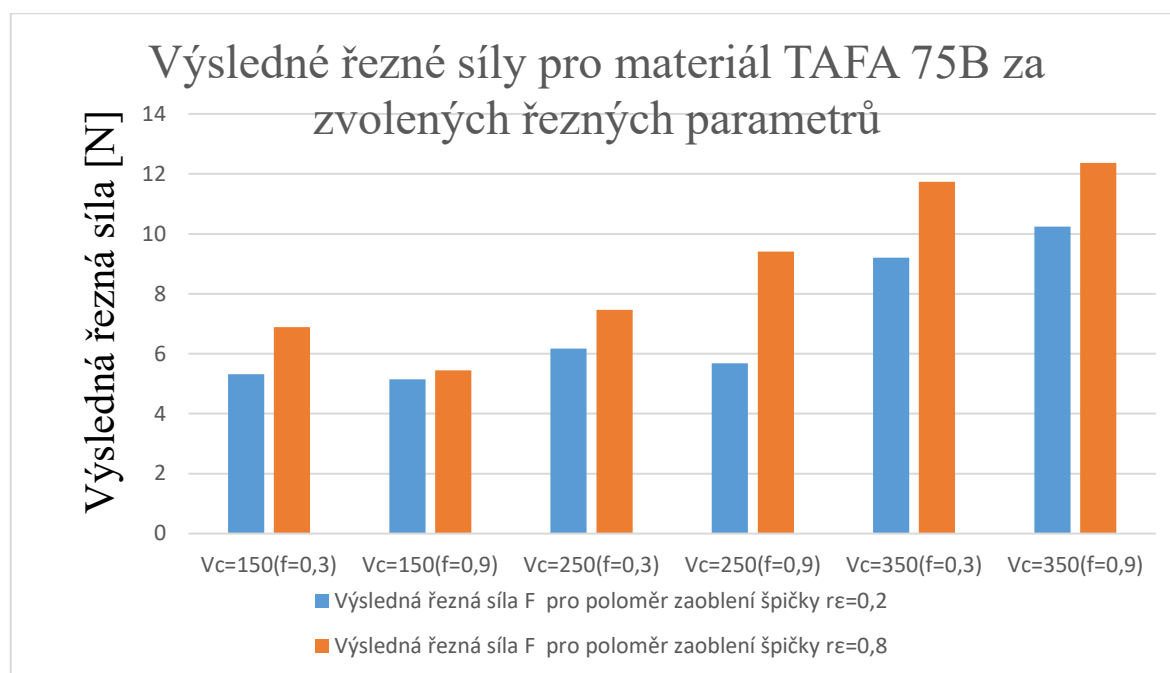


Graf 4.2 Výsledné hodnoty drsnosti materiálu TAFA 75B obrobeného pomocí zvolených řezných parametrů a VBD s odlišným poloměrem zaoblení špičky

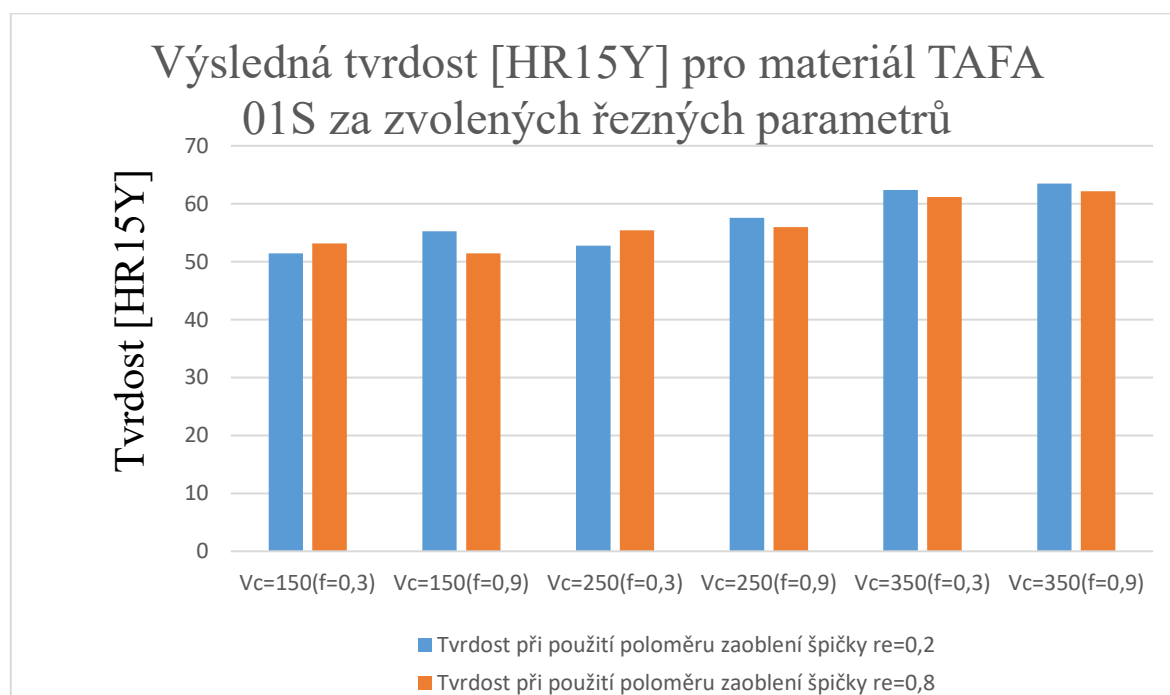


Graf 4.3 Výsledné hodnoty řezných sil  $F$  při obrábění materiálu TAFA 01S pomocí zvolených řezných parametrů a VBD s odlišným poloměrem zaoblení špičky

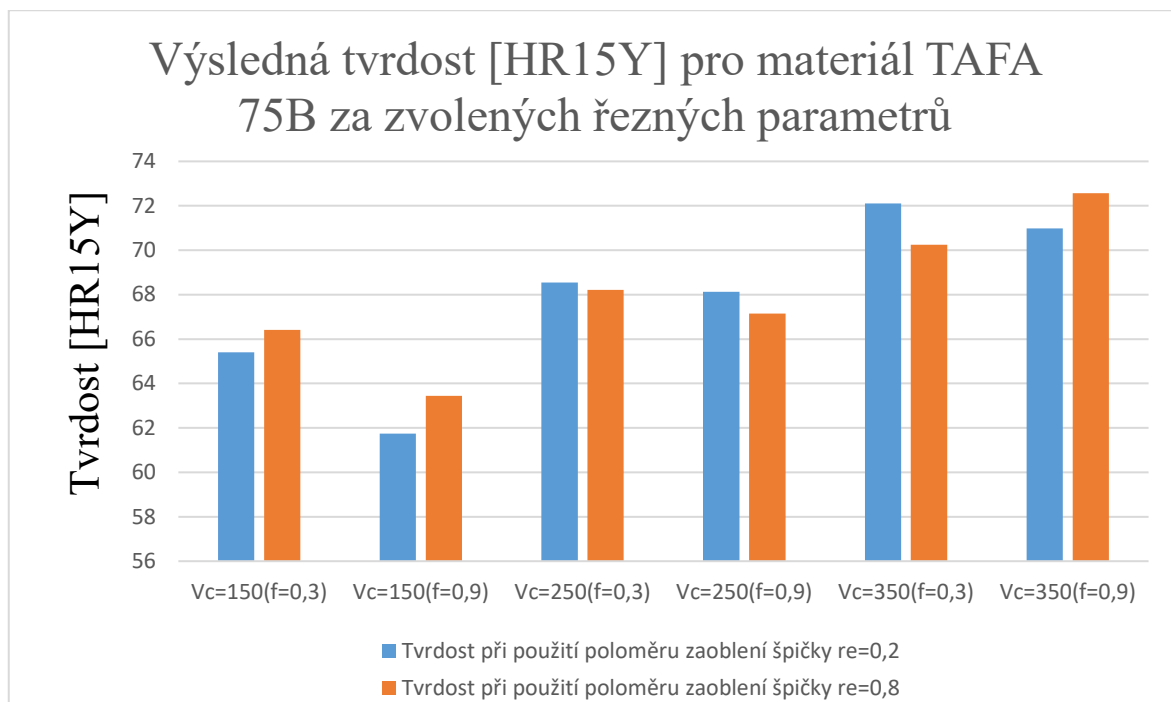




Graf 4.4 Výsledné hodnoty řezných sil F při obrábění materiálu TAFA 01S pomocí zvolených řezných parametrů a VBD s odlišným poloměrem zaoblení špičky



Graf 4.5 Výsledné hodnoty tvrdosti při obrábění materiálu TAFA 01S pomocí zvolených řezných parametrů a VBD s odlišným poloměrem zaoblení špičky



Graf 4.5 Výsledné hodnoty tvrdosti při obrábění materiálu TAFA 01S pomocí zvolených řezných parametrů a VBD s odlišným poloměrem zaoblení špičky

## **Závěr**

Diplomová práce je zaměřena na obrábění žárových nástřiků se spojitostí na přerušovaný řez. V rámci měření se práce zaměřuje na výsledné řezné síly v průběhu podélného soustružení a integrity povrchu po obrobení. Začátek práce je věnován teorii o žárových nástřicích, jejich využití v leteckém průmyslu a rozdělení a popsání zařízení potřebných k aplikaci. V další části je probrána teorie potřebná k pochopení procesu řezání a dále problematika přerušovaného řezu. Práce pokračuje popsáním jednotlivých metod a zařízení potřebných k měření tvrdosti, drsnosti testovaných vzorků a k měření složek řezných sil působících na nástroj při obrábění.

V praktické části diplomové práce byly zpočátku popsány materiály Praxair TAFA 01S a Praxair TAFA 75B, které se nanasly na dva různé typy vzorků technologií ARC spray. U prvního typu vzorku ve tvaru mezikruží byl popsán způsob nanesení materiálu tak, aby byl schopen simulovat průběh přerušovaného řezání, při kterém byly měřeny jednotlivé složky řezných sil a z těch následně vypočteny výsledné řezné síly. Druhé použité typy vzorků byly ve tvaru válečku, na které byly nanесeny totožné materiály jako na mezikruží. Válečky byly následně soustruženy za stejných řezných podmínek jako vzorky pro měření složek řezných sil a sloužily pro zjištění a porovnání výsledné tvrdosti a drsnosti. Kromě odlišných řezných parametrů byly také použity dva druhy vyměnitelných břitových destiček, které se lišily poloměrem zaoblení řezné špičky.

Proces nanášení materiálu na vzorky včetně měření výsledné tvrdosti obrobených nástřiků proběhl ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Testy pro zjištění složek řezných sil a měření drsnosti proběhly v laboratořích Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – TUO.

Veškeré naměřené výsledky byly statisticky zpracovány a graficky porovnány. Z výsledků vyplývá, že výsledná řezná síla se zvyšuje se zvyšujícími se řeznými parametry i se zvyšujícím se poloměrem zaoblení řezné špičky nástroje. Z měření drsnosti o obrobení je zřejmé, že vyšší hodnoty použité řezné rychlosti a posuvu mají kladný vliv na výslednou drsnost povrchu. Vliv velikosti zaoblení řezné špičky nástroje je nejednoznačný z důvodu nedostatečně velkého rozdílu zaoblení. Porovnání výsledné tvrdosti jasně potvrzuje zvyšující se zpevňování povrchové vrstvy obrobeného materiálu se zvyšujícími se řeznými parametry. Projevení vlivu zaoblení nástroje není jasně prokazatelné. Všechny naměřené hodnoty až na některé výjimky potvrzují teorii obrábění.

Z výsledků vychází doporučení, aby pro podélné soustružení testovaných nástřiků byly použity hodnoty  $v_c=350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f=0,9 \text{ mm}$  a VBD s poloměrem zaoblení řezné špičky  $r_\epsilon=0,8 \text{ mm}$ . Bylo by ovšem vhodné pokračovat v dalším testování za použití většího počtu vzorků a řezných parametrů pro zajištění ještě vyšší kvality výsledného povrchu.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Zlámalovi Ph.D. za vedení a odbornou pomoc při vypracování práce.

Diplomová práce byla vypracována v rámci projektu: „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## Použitá literatura

1. HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka, Radek ENŽL a Olga BLÁHOVÁ. *Žárové nástřiky: Moderní technologie povrchových úprav* [online]. 2003 [cit. 2019-04-02].
2. HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., ZAHÁLKA, F., KAŠPAROVÁ, M., BLÁHOVÁ, O. *Vlastnosti strukturních komponent žárových nástřiků*. In Vrstvy a povlaky 2008. Trenčín: DIGITAL GRAPHIC, 2008. s. 57-63. ISBN: 978-80-969310-7-1
3. *Researchgate: Schematic structure of a thermal sprayed coating* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-structure-of-a-thermal-sprayed-coating-and-bonding-mechanisms-17\\_fig2\\_313165229](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-structure-of-a-thermal-sprayed-coating-and-bonding-mechanisms-17_fig2_313165229)
4. *Empoweringpumps: Coating Microstructures* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://empoweringpumps.com/tstcoatings-microstructures-science-thermal-spray-coatings/>
5. *Gordonengland: Nature of Thermal Spray Coatings* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>
6. Mmspektrum.com. *Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu*. [online]. 2001 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-zaroveho-nastriku-v-leteckemprumyslu.html>
7. *Awamdhlwmaterialsengineers: Turbine blade mechanical properties* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://awamdhlwmaterialsengineers.wordpress.com/2014/12/01/thermal-barrier-coatings-turbine-blades/>
8. *Imrtest: Thermal Spray Coating Analysis* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.imrtest.com/tests/thermal-spray-coating-analysis>
9. Ghasripoor, Farshad. Schmid, Richard. Dorfman, Mitchell. *Abradable Coatings Increase Gas Turbine Engine Efficiency* [online]. 2001 [cit.2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=739>
10. *Oerlikon: Thermal Spray Abradable Materials for Clearance Control Coatings* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/coating-materials-thermal-spray/abradables-polymer-fillers/>



11. TSTcoating.com. Thermal barrier [online]. 2016 [cit.2019-05-02]. Dostupné z: [http://www.tstcoatings.com/thermal\\_barrier.html](http://www.tstcoatings.com/thermal_barrier.html)
12. KRAJKOVIČ, Pavel. *Optimalizace obráběcích parametrů, abradable nástřiků používaných v leteckém průmyslu*. Brno 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 89 s. 1 příloha. Ing. Milan Kalivoda.
13. *Fst: High Velocity Oxygen Fuel* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.fst.nl/systems/hvof-high-velocity-oxygen-fuel-thermal-spray/>
14. *Advanced-coating: Detonation spray process* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.advanced-coating.com/english/spraying-detonation.htm>
15. *Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu*. DOI: 010539. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-zaroveho-nastriku-v-leteckem-prumyslu.html>
16. *Researchgate: Schematic drawing of the wire arc spraying process* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-the-wire-arc-spraying-process-WAS-7\\_fig4\\_328415993](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-the-wire-arc-spraying-process-WAS-7_fig4_328415993)
17. DAVIS, J.R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. The material Information society, 2004. ISBN 0-87170-795-0.
18. *Plasma Spraying: The plasma coating process* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.amphardchrome.co.uk/plasma-spraying.php>
19. ŠILDBERGER, Radek. *Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem*. Brno, 2008. 76 s., 10 příloh, 1CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček. Dostupné z: [ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace)
20. *THERMAL PROJECTION FOR INDUSTRY: Thermal spray coatings* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.tcpg.fr/thermal-sprayng.html>
21. *Technologie II*. 1. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
22. BRYCHTA, Josef. *Obrábění I: návody pro cvičení*. Část 2. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0577-4. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
23. Die Wahl fällt leicht bei Rostfrei – Drehen. SECO TOOLS AB. Sweden, Örebro: Graficka Byrán. 1993. Ein Meister der Zerspanung. ST934732T.

24. *Interrupted Turning: Innovations in turning tooling combat the challenges of interrupted cutting* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/article/management/interrupted-turning>
25. MACHÁČ, M. *Měření tvrdosti materiálů a zpracování zjištěných hodnot..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57s,4přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda
26. Zkoušky tvrdosti. *Mat Net* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>
27. *Pilsedu: Obrázky a schémata pro zkoušky tvrdosti* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef\\_gruber/kom/obrhhard.html](http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/kom/obrhhard.html)
28. *MĚŘENÍ SLOŽEK SÍLY ŘEZÁNÍ: Dynamometry* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_08.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf)
29. *PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ: Dynamometry* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_09.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf)
30. MIKULÁŠEK, Tomáš. *Zařízení na měření výkonu spalovacích motorů.* Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický Ústav. 37 s. doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
31. VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, ALFA/SNTL Bratislava, 1985.
32. *Kontrola drsnosti povrchu: Základní pojmy* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102>
33. HAVLÍK, Luboš. *Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavičky MT3.* Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 88 s. přílohy 3. Vedoucí práce Ing. Karel Kouřil, Ph.D.
34. *Měření drsnosti povrchu: Metody měření drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>
35. *Kvalitativní hodnocení: Měření drsnosti povrchů* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/xoi08h/BP\\_Gajdok.pdf](https://theses.cz/id/xoi08h/BP_Gajdok.pdf)
36. TRUNDA, V. *Hodnocení kvality povrchu po laserovém řezání: Bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie, 2017, 61 s. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

- 
37. BUMBÁLEK, B. - Fyzikální podstata rezání – Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, FSI [online], 2005, dostupné z [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Opora05\\_Fyzikalni\\_podstata\\_rezani.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf)
38. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.